UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO

SÉRGIO ROSSI JÚNIOR

ESTUDO DO PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS: CASO TCSC

VITÓRIA-ES

DEZ/2022

Sérgio Rossi Júnior

ESTUDO DO PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS: CASO TCSC

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Sérgio Rossi Júnior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Vitória-ES

Dez/2022

Sérgio Rossi Júnior

ESTUDO DO PRINCÍPIO DE OPERAÇÃO DE UM DISPOSITIVO FACTS: CASO TCSC

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno Sérgio Rossi Júnior, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovado em 2 de Dezembro de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Hélio Marcos André Antunes

Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador

Prof. MSc. Adriano Fazolo Nardoto
Coordenadoria de Eletrotécnica- IFES São Mateus
Examinador

Vitória-ES

Dez/2022

RESUMO

O interesse em desenvolver metodologias que demonstrem os benefícios dos Controladores FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em um sistema elétrico de potência é cada vez maior pois sua comprovada resposta é uma solução para problemas reais do sistema de potência. Para as autoridades de geração e distribuição, na fase de planejamento, é necessário um estudo que resulte em uma estimativa de investimento econômico necessário, analisando a viabilidade de instalar estes controladores em linhas de transmissão existentes ou a construção de novas linhas de transmissão que possam ter ou não dispositivos FACTS avaliando sempre o impacto técnico futuro da decisão tomada.

Os Dispositivos FACTS, através de sua capacidade de atuação sobre parâmetros do sistema de potência, possibilitam a melhoria na capacidade de transmissão da rede elétrica, além do maior controle sobre os fluxos de potência ativa e reativa do sistema, e também das magnitudes de tensão das barras. Neste trabalho são apresentados os aspectos técnicos dos Controladores FACTS na operação dos sistemas elétricos de potência. Foi realizado um levantamento técnico sobre as mudanças no fluxo de potência.

Os FACTS são utilizados nos sistemas elétricos de potência para aumentar o limite de transferência de potência nas linhas de transmissão e também para melhorar as estabilidades dinâmica e transitória. O modelo do Controlador FACTS escolhido para estudo aprofundado nesta pesquisa é o TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor). O principal objetivo será entender a utilização do compensador FACTS TCSC no controle do fluxo de potência do sistema de transmissão de energia. A compensação série de linhas de transmissão se faz com o objetivo de aumentar a capacidade de transferência de potência. Contudo, dos testes apresentados neste trabalho, fica comprovada a boa utilização do dispositivo TCSC na melhoria do fluxo de potência dos sistemas elétricos de potência, além da comprovação da teoria do TCSC através de testes de simulação.

Palavras-chave: *FACTS*; Fluxo de Potência; *TCSC*; Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

The interest in developing methodologies that demonstrate the benefits of FACTS Controllers in an electrical power system is increasing because its proven answer that is a solution to real problems in the power system. For the generation and distribution authorities, in the planning phase, a study is required that results in an estimate of the necessary economic investment, analyzing the feasibility of installing these controllers in existing transmission lines or the construction of new transmission lines that may have or not FACTS devices, always evaluating the future technical impact of the decision taken.

The FACTS devices, through their ability to act on parameters of the power system, make it possible to improve the transmission capacity of the electrical network, in addition to greater control over the flows of active and reactive power in the system, as well as the voltage magnitudes of the bars. This work presents the technical aspects of FACTS Controllers (Flexible AC Transmission Systems) in the operation of electrical power systems. A technical survey was carried out on the changes in the power flow.

FACTS are used in electrical power systems to increase the power transfer limit in transmission lines and also to improve dynamic and transient stabilities. The model of FACTS Controllers chosen for in-depth study in this research is the TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor). The main objective will be to understand the use of the FACTS TCSC compensator in the control of the power flow of the energy transmission system, thus obtaining as a result a TCSC device, which can be controlled through the proper triggering of the thyristors. The series compensation of transmission lines is done with the objective of increasing the power transfer capacity. However, from the tests presented in this work, the good use of the TCSC device in improving the power flow of electrical power systems is proven, in addition to the proof of the TCSC theory through simulation tests. .

Keywords: FACTS, Power Flow, TCSC, Power Electrical System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxo de Malha. 19
Figura 2 – Fluxo de Energia com caminhos paralelos. 19
Figura 3 – Controle do fluxo de potência ativa exercido por dispositivos FACTS. . 21
Figura 4 – Fluxo de Potência controlado com Impedância Variável. 21
Figura 5 – Fluxo de Potência controlado com ângulo de fase variável. 22
Figura 6 – Fluxo de Potência com e sem compensação. 23
Figura 7 – Conexão *shunt*. 36
Figura 8 – Conexão Série. 36
Figura 9 – Circuito SVC. 37
Figura 10 – Circuito TSC. 38
Figura 11 – Circuito TCR. 39
Figura 12 – Circuito TCSC. 40
Figura 13 – Circuito SSSC. 41
Figura 14 – Circuito STATCOM. 42
Figura 15 – Inversor STATCOM. 42
Figura 16 – Circuito TSR. 43
Figura 17 – Circuito TSSC. 44
Figura 18 – Circuito TCSR e TSSR. 45
Figura 19 – Modelo UPFC. 46
Figura 20 – Circuito UPFC. 46
Figura 21 – Representação do TCSC. 54
Figura 22 – Tiristor Bloqueado. 55
Figura 23 – Tiristor em By-Pass. 56
Figura 24 – Modo Vernier. 57
Figura 25 – Tensão sobre o capacitor no modo de operação Vernier. 57
Figura 26 – Corrente no tiristor do TCSC no modo de operação Vernier. 58
Figura 27 – Corrente no capacitor do TCSC no modo de operação Vernier. 58
Figura 28 – Representação de um TCSC. 59
Figura 29 – Ângulo de disparo e ângulo de condução. 60
Figura 30 – Característica da impedância Xtcsc pelo ângulo alfa. 61
Figura 31 – Modelo pi de uma linha de transmissão com um TCSC. 61
Figura 32 – Fluxo de potência ativa X ângulo teta. 63
Figura 33 – Simbologia do TRIAC. 64
Figura 34 – Forma de onda de tensão sobre a carga com disparo em 30 graus. . . . 65
Figura 35 – Forma de onda de tensão sobre a carga com disparo em 90 graus. . . . 65
Figura 36 – Divisão do circuito do TCSC. 68

Figura 37 – Circuito do TCSC representado no PSIM. 70
Figura 38 – Legenda dos blocos do PSIM. 71
Figura 39 – Bloco de disparo. 72
Figura 40 – Ondas antes e depois da chave tiristorizada. 72
Figura 41 – Tensão Vc sobre o Capacitor do TCSC no modo de condução Vernier Indutivo. 75
Figura 42 – Corrente no IL no Tiristor no modo de condução Vernier Indutivo. . . 76
Figura 43 – Corrente Ic no Capacitor no modo de condução Vernier Indutivo. . . . 76
Figura 44 – Tensão Vc sobre o Capacitor do TCSC no modo de condução Vernier Capacitivo. 77
Figura 45 – Corrente IL no Tiristor no modo de condução Vernier Capacitivo. . . . 78
Figura 46 – Corrente Ic no Capacitor no modo de condução Vernier Capacitivo. . . 78
Figura 47 – Circuito do TCSC utilizando valores comerciais. 79
Figura 48 – Tensão Vc sobre o Capacitor do novo circuito do TCSC com valores comerciais. 80
Figura 49 – Corrente IL no Tiristor do novo circuito do TCSC com valores comerciais. 81
Figura 50 – Corrente Ic no Capacitor do novo circuito do TCSC com valores comerciais. 81
Figura 51 – Curvas de Fluxo de Potência dos testes do TCSC. 82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Soluções na operação em regime permanente. 48
Tabela 2 – Soluções na operação em regime transitório. 50
Tabela 3 – Avaliação dos dispositivos FACTS. 51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCEE	*Câmara de Comercialização de Energia Elétrica*
CSC	*Convertible Static Compensator*
FACTS	*Flexible AC Transmission Systems*
GTO	*Gate Turn-off Thyristor*
HVDC	*High Voltage Direct Current*
IEEE	*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*
IGBT	*Insulated Gate Bipolar Transistor*
IPFC	*Interline Power Flow Controller*
POD	*Power Oscillation Damping*
SEP	*Sistema Elétrico de Potência*
SSSC	*Static Synchronous Series Compensator*
STATCOM	*Static Synchronous Compensator*
SRC	*Sillicon Controlled Rectifier*
SVC	*Static Var Compensator*
SVG	*Static Var Generator*
TCPST	*Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer*
TCR	*Thyristor Controlled Reactor*
TCSC	*Thyristor Controlled Series Capacitor*
TCSR	*Thyristor Controlled Series Reactor*
TRIAC	*Triodo de Corrente Alternada*
TSC	*Thyristor Switched Capacitor*
TSR	*Thyristor Switched Reactor*
TSSC	*Thyristor Switched Series Capacitor*

TSSR	*Thyristor Switched Series Reactor*
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UPFC	*Unified Power Flow Controller*
VSC	*Voltage Source Converter*
WAPA	*Western Area Power Administration*

LISTA DE SÍMBOLOS

α	*Ângulo de disparo dos tiristores*
C	*Capacitor do TCSC*
i	*Corrente na Linha de Transmissão*
$i_L(\alpha)$	*Corrente no TCR do TCSC em função do ângulo de disparo*
$i_C(\alpha)$	*Corrente no Capacitor do TCSC em função do ângulo de disparo*
L	*Indutor do TCSC*
RLC	*Circuito composto por Resistor, Indutor e Capacitor*
$V_C(\alpha)$	*Tensão no Capacitor em função do ângulo de disparo*
X_{TCSC}	*Reatância equivalente do TCSC*
X_C	*Reatância do Capacitor do TCSC*
$X_L(\alpha)$	*Reatância do TCR em função do ângulo de disparo*
ω	*Velocidade Angular*
π	*Razão entre a circunferência e o diâmetro de um círculo*
$B(\alpha)$	*Susceptância do TCSC em função do ângulo de disparo*
∞	*Infinito numérico*
σ	*Ângulo de condução dos tiristores*
σ_{Clim}	*Ângulo de disparo limite mínimo para o modo de condução Vernier capacitivo*
σ_{Llim}	*Ângulo de disparo limite mínimo para o modo de condução Vernier indutivo*
V_i	*Tensão da barra i*
θ_i	*Ângulo da tensão da barra i*
V_j	*Tensão da barra j*
θ_j	*Ângulo da tensão da barra j*

I_{ij}	*Corrente que flui entre as barras i e j*
I_{ji}	*Corrente que flui entre as barras j e i*
K	*Grau de compensação*
P_{ij}	*Potência Ativa que flui entre as barras i e j*
X	*Reatância da linha de transmissão*
θ_{ij}	*Ângulo entre as tensões V_i e V_j*
X_{LLinha}	*Reatância da linha de transmissão*
L_{Linha}	*Indutor da linha de transmissão*
f	*Frequência*
X_{CTCSC}	*Reatância do Capacitor do TCSC*
C_{TCSC}	*Capacitor do TCSC*
X_{LTCSC}	*Reatância do TCR do TCSC*
L_{TCSC}	*Indutor do TCSC*
R_1	*Resistor de Carga*
L_1	*Indutor de Carga*
C_1	*Capacitor de Carga*
X_{eq}	*Reatância equivalente da linha de transmissão*
I_{LTCSC}	*Corrente no TCR do TCSC*
I_{CTCSC}	*Corrente no Capacitor do TCSC*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO . . . 15
1.1 Apresentação . . . 15
1.2 Objetivos . . . 16
1.3 Estrutura do Texto . . . 17

2 EMBASAMENTO TEÓRICO . . . 18
2.1 Introdução . . . 18
2.2 Fluxo de potência em linha de transmissão . . . 18
2.2.1 Uso de FACTS em linha de transmissão . . . 20
2.2.2 Compensação Serie: Exemplo de ganho no fluxo de potência. . . . 22
2.2.3 Limitação na capacidade de carga numa linha de transmissão . . . 23
2.2.3.1 Limitação Térmica . . . 23
2.2.3.2 Limitações Dielétricas . . . 24
2.2.3.3 Limitação de Estabilidade . . . 25
2.3 Tecnologias FACTS . . . 27
2.3.1 Definição . . . 27
2.3.2 Uso de FACTS . . . 28
2.3.3 Vantagens dos Sistemas Flexibilizados com FACTS . . . 29
2.4 Tipos de classificações de controladores FACTS . . . 30
2.4.1 Classificação de categoria dos controladores . . . 30
2.4.1.1 Controladores *Shunt* . . . 31
2.4.1.2 Controladores Série . . . 31
2.4.1.3 Controladores Séries-*Shunt* . . . 32
2.4.2 Classificação quanto à geração dos controladores . . . 32
2.4.2.1 Primeira Geração . . . 32
2.4.2.1.1 Conexão *Shunt* . . . 32
2.4.2.1.2 Conexão Série . . . 33
2.4.2.2 Segunda Geração . . . 33
2.4.2.2.1 Conexão *Shunt* . . . 33
2.4.2.2.2 Conexão Série . . . 33
2.4.2.3 Terceira Geração . . . 33
2.4.2.4 Quarta Geração . . . 34
2.4.3 Classificação de Chaveamento, Controle e Avançados . . . 34
2.4.3.1 Controladores FACTS Chaveados . . . 34
2.4.3.2 Controladores FACTS Controlados . . . 34
2.4.3.3 Controladores FACTS Avançados . . . 35

2.5 Tipos de Conexão de dispositivos FACTS no sistema de potência 35
2.5.1 Conexão *shunt* . . . 35
2.5.2 Conexão série . . . 36
2.6 Apresentação de dispositivos FACTS . . . 37
2.6.1 SVC - *Static Var Compensator* . . . 37
2.6.2 TSC - *Thyristor Switched Capacitor* . . . 38
2.6.3 TCR - *Thyristor Controller Reactor* . . . 38
2.6.4 TCSC - *Thyritos Controlled Series Capacitor* . . . 39
2.6.5 SSSC - *Static Syncronous Series Compensator* . . . 40
2.6.6 STATCOM - *Static Syncronous Compensator* . . . 41
2.6.7 TSR - *Thyristor Switched Reator* . . . 42
2.6.8 TSSC - *Thyristor Switched Series Capacitor* . . . 43
2.6.9 TCSR - *Thyristor Controlled Series Reactor* e TSSR - *Thyristor Switched Series Reactor* . . . 44
2.6.10 UPFC - *Unified Power Flow Controller* . . . 45
2.7 Dispositivos FACTS descritos por suas características de atuação . 47
2.7.1 Soluções focadas na operação em regime permanente . . . 47
2.7.2 Soluções focadas na operação em regime transitório . . . 49
2.8 Dispositivos FACTS mais utilizados e suas principais funcionalidades 51
2.9 Utilização de FACTS pelo mundo . . . 52
2.10 Dispositivos FACTS TCSC . . . 53
2.10.1 Modos de Operação do Compensador TCSC . . . 55
2.10.1.1 Tiristor Bloqueado . . . 55
2.10.1.2 Tiristor em *By-Pass* . . . 55
2.10.1.3 Modo Vernier . . . 56
2.10.1.4 Fluxo de potência em linha de transmissão com um TCSC . . . 58
2.10.1.5 Características do TCSC . . . 63
2.11 Triodo de corrente alternada (TRIAC) . . . 64
2.12 Resumo da seção . . . 66

3 DESENVOLVIMENTO . . . 67
3.1 Introdução . . . 67
3.2 Divisão do circuito do TCSC . . . 67
3.3 Bloco de geração e linha de transmissão . . . 68
3.4 Bloco do compensador TCSC . . . 68
3.5 Desenvolvimento do dispositivo TCSC em *software* . . . 69
3.5.1 *Software* simulador de circuitos elétricos PSIM . . . 70
3.5.2 Circuito do TCSC . . . 70
3.5.3 Bloco disparador para chaves do PSIM . . . 71
3.6 Resumo da seção . . . 73

4 RESULTADOS 74
4.1 Introdução 74
4.2 Testes do circuito TCSC 74
4.2.1 Testes do circuito do TCSC com disparo em 110° 75
4.2.2 Testes do circuito do TCSC com disparo em 135° 76
4.2.3 Teste do circuito do TCSC com valores comerciais de indutor e capacitor . 78
4.2.4 Resumo da seção 81

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS 84

REFERÊNCIAS 86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O Sistemas Elétricos de Potência (SEP) brasileiro é caracterizado como o conjunto de toda as instalações e equipamentos destinadas a geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, incluindo a medição. Para seu correto funcionamento é necessário que satisfaça condições de confiabilidade, qualidade de energia e economia. É possível entender que para que o SEP funcione adequadamente é esperado que seja capaz de entregar energia elétrica com o mínimo de falhas possível, mesmo que em condições extremas de dificuldade (TORTELLI, 2010).

Segundo (ABRANTES et al., 2013), mesmo com investimentos altos no SEP, o sistema continua a operar próximo ao seu limite de capacidade e, devido, muitas vezes, a falta de possibilidades o sistema não se apresenta capaz de crescer em termos de construções de linhas de transmissões e nem mesmo de fontes geradoras que possibilitariam a estabilidade do processo. Além de estar sujeito a perturbações que possam vir a ocorrer na linha que podem ser de grande ou pequena escala e que faz necessário sempre um estudo sobre a estabilidade da rede. Quando é analisado uma falta na linha de transmissão ou uma perda de sincronismo por parte de uma fonte geradora é feita uma análise de estabilidade provisória. Para casos de ocorrências de desvio de carga que necessitem de um ajuste da fonte de geração são feitas análises de estabilidade dinâmica, ou de estabilidade com pequenas perturbações (ABRANTES et al., 2013).

Segundo (ELÉTRICO, 2017), a geração de energia hidráulica teve uma redução na produção de energia, já a geração de energia térmica, eólica e solar tiveram aumento. No acumulado houve um aumento na geração de energia de 4,1% no ano de 2021 em relação ao ano de 2020. No entanto, o consumo de energia por parte da população também sofreu um aumento de 4,1% no mesmo período. Isso mostra a necessidade constante de geração sempre maior de energia para acompanhamento do aumento de consumo (ELÉTRICO, 2017).

Para tentar acompanhar esse aumento de consumo, o sistema de transmissão vem tentando várias soluções, uma delas a implantação ou duplicação de linhas de transmissão. Porém, tais soluções acarretam num alto custo de serviço, além de dependerem diretamente da viabilidade de rotas, podendo esbarrar, muitas vezes, em barreiras ambientais (TORTELLI, 2010).

Buscando a gestão e operação de um sistema elétrico eficiente torna-se cada vez mais

necessário o uso de meios de controles diretos de fluxos de potência. Este controle de fluxo pode permitir um direcionamento de potência para regiões necessitadas. Com o desenvolvimento de tecnologias capazes de controlar variáveis elétricas é possível a otimização do uso de equipamentos na rede, de modo a garantir a qualidade de energia e ainda aumentar a proteção e segurança (MIOTTO, 2010).

A criação de dispositivos chamados FACTS (do inglês *Flexible Alternating Current Transmission Systems*) visaram permitir o controle de fluxo de potência através de rotas pré-estabelecidas e um aumento dos limites de transmissão de sistemas de energia já existentes, além de serem capazes de introduzir um amortecimento em ocasionais oscilações eletromecânicas quando equipados com controladores suplementares de amortecimento, chamados de POD (do inglês *Power Oscillation Damping*) (SONG; JOHNS, 1999).

Os dispositivos FACTS são divididos em quatro categorias que depende da forma como foram instalados nas linhas de transmissão. Sendo: Controladores Série, Controladores em derivação, Controladores combinados série-série e Controladores combinados série-derivação. Podem ser classificados, também, com relação a tecnologia da chave eletrônica utilizada (WATANABE et al., 1998).

O foco deste trabalho são as FACTS TCSC (do inglês *Thyristor Controlled Series Compensator*), que são utilizadas para otimização de fluxo de potência e amortecimento de oscilação. Neste trabalho é caracterizado a TCSC de forma a apresentar o cálculo feito e através de simulação,comprovar o funcinamento de uma TCSC em funcionamento real, apresentando, assim, os gráficos de resposta.

1.2 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o funcionamento de um dispositivo FACTS TCSC na transmissão de energia elétrica através da simulação de um circuito que representa uma linha de transmissão monofásica em menor escala, com menor potência. O estudo terá como retorno uma análise dos parâmetros do dispositivo FACTS TCSC e do fluxo de potência desta linha de transmissão através do comparativo entre os resultados teóricos e de simulação.

Como objetivo específico desse trabalho pode-se citar a revisão bibliográfica do assunto, buscando as essências que sustentam a tecnologia das FACTS, o entender de como esses compensadores são implementados em linhas de transmissão, quais os tipos de FACTS e quais as características elas possuem, realizar a construção e a simulação de

um dispositivo FACTS TCSC capaz de ser comparado com as referências bibliográficas e com o embasamento de documentos técnicos como artigos do IEEE, Teses e Dissertações, além de Monografias e Livros de Engenharia Elétrica. A análise crítica dos resultados em comparação com o teórico é de fundamental importância para embasar este documento, tendo em vista a comprovação do funcionamento da tecnologia, que une conceitos de Engenharia Elétrica como a Eletrônica de Potência, a Transmissão Elétrica de Potência e os fundamentos mais simples dos Circuito Elétricos.

1.3 Estrutura do Texto

A estrutura deste documento é pensada de forma a construir com coerência uma base textual que permita o entendimento do trabalho realiza, além da apresentação de fato do trabalho. Os capítulos são divididos em tópicos para facilitar a melhor compreensão.

O capítulo introdutório é constituído de uma breve análise do problema a fim de justificar a realização do trabalho e contextualiza-lo a realidade do mundo, além de apresentar o objetivo do trabalho.

No capítulo 2 são apresentados os conceitos necessários para entendimento do trabalho, sendo referenciados vários trabalhos que são utilizados de base. São explanados sobre linha de transmissão e fluxo de potência, a definição do que são FACTS, sua classificação e suas formas de uso, além de vantagens e desvantagens.

No capítulo 3 são apresentados os desenvolvimentos do projeto, com demonstrativos de como foram feitos os cálculos que possibilitaram chegar aos valores dos componentes utilizados no projeto, tal como a demonstração do *software* que foi utilizado.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos, demostrando o funcionamento dos circuitos projetados e suas respostas mediante variações no sistema, além de apresentar uma análise sobre o apresentado de teoria e o obtido na simulação.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e apresentadas algumas ideias pertinentes para trabalhos futuros que possam usar este documento como base.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Introdução

Neste capítulo é feito uma breve apresentação sobre linha de transmissão e as intempéries que podem acontecer ao sistema de energia por conta da linha de transmissão. Também é falado de FACTS e como podem auxiliar linhas de transmissão.

Nas subseções seguintes são apresentados conteúdos que são essenciais para o entendimento dos estudos desenvolvidos neste trabalho, assim, elucidando informações completas sobre as FACTS, além de introduzir esta seção com informações sobre fluxo de potência e problemas que possam ocorrer em linhas de transmissões.

2.2 Fluxo de potência em linha de transmissão

O desempenho do ponto de vista elétrico das linhas de transmissão depende de suas características físicas e da topologia do sistema interligado. Elas ditam o seu comportamento em regime normal de operação, definindo os parâmetros elétricos da linha, além dos limites no fluxo de potência ao longo das linhas (SILVA et al., 2016).

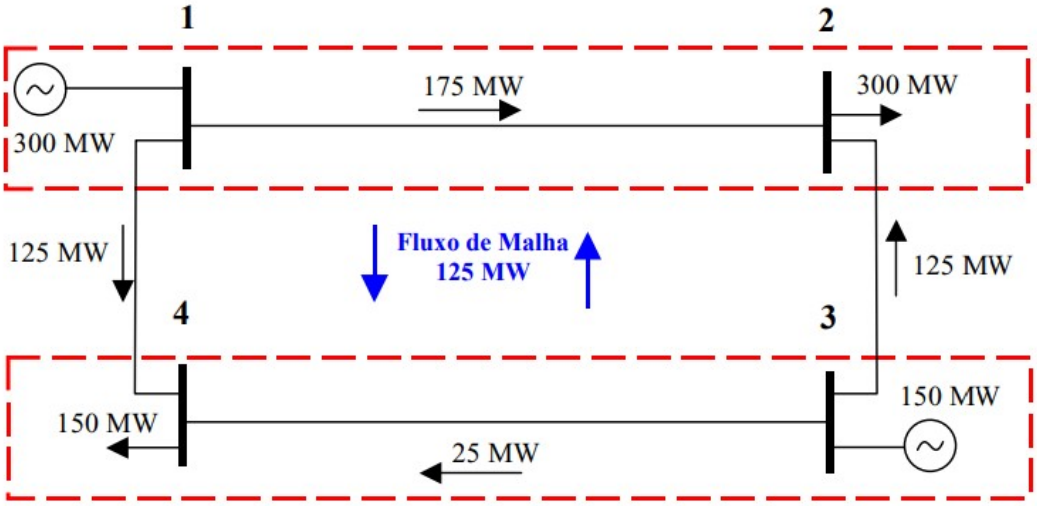
O transporte de energia elétrica por meio das linhas de transmissão tem a principal função de ser eficiente, confiável e econômico. E para transportar uma quantidade definida de energia elétrica a uma distância preestabelecida, existe um número grande de variáveis relevantes associadas à linha (SILVA et al., 2016).

A análise do fluxo de potência em linhas de transmissão consiste basicamente em determinar um ponto de operação da rede para uma dada condição de carga e geração durante o regime permanente senoidal, também conhecido como modo de operação normal. Para uma demanda de potência, conhecida ou estimada, nas barras de carga e a potência disponível proveniente dos geradores, é possível calcular as potências que fluem nas linhas de transmissão (LIMA, 2020).

Na Figura 1 tem-se um exemplo de problema de fluxo de malha. O gerador de 300MW na barra 1 fornece 175MW de carga para a barra 2 e 125MW de carga para a barra 4. Algo semelhante ocorre com o gerador da barra 3. Se o gerador da barra 1 e a demanda

na barra 2 forem de uma mesma empresa, percebe-se que a empresa não pode transmitir os 300 MW gerados diretamente para a demanda na barra 2. Assim, aparece uma maior dependência entre as empresas, como mostra a Figura 1 (MIASAKI, 2006).

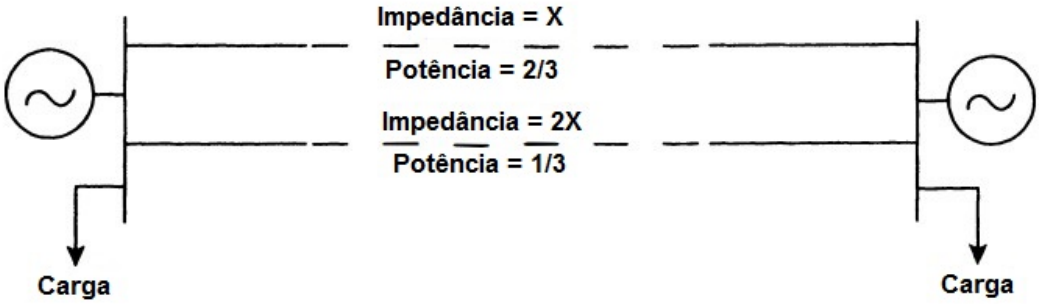
Figura 1 – Fluxo de Malha.



Fonte: (MIASAKI, 2006).

Considere um caso muito simples de fluxo de potência como o da Figura 2, através de dois caminhos de uma área de geração excedente, mostrado como um gerador equivalente à esquerda, para uma área de geração deficitária à direita. Sem qualquer controle, o fluxo de potência é baseado no inverso das impedâncias das linhas de transmissão impedâncias (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Figura 2 – Fluxo de Energia com caminhos paralelos.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Além de questões contratuais e de propriedade sobre quais linhas estão vinculadas, é provável que a linha de impedância inferior fique sobrecarregada, limitando assim o carregamento em ambos os caminhos, mesmo que o caminho de impedância mais alta não seja completamente carregado. Também não haveria incentivo para aumentar a capacidade

de corrente do caminho que já está sobrecarregado, porque desta forma a impedância seria diminuída ainda mais tornando-se um investimento ruim, ainda mais se a o caminho de impedância mais elevada já tiver essa capacidade suficiente disponível (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

2.2.1 Uso de FACTS em linha de transmissão

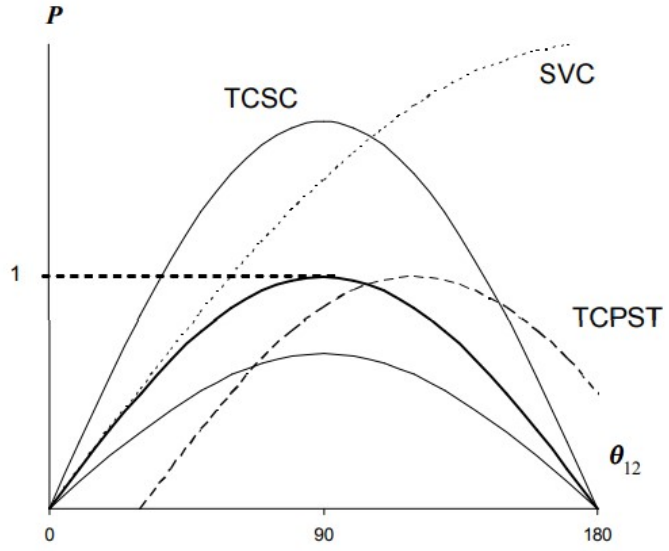
Pode-se dizer que FACTS é um conceito tecnológico de transporte de energia elétrica por sistemas flexíveis de transmissão em corrente alternada, que permite novas estratégias de operação e controle dinâmico dos sistemas (MIASAKI, 2006).

Dispositivos FACTS podem ser utilizados para alcançar diversos objetivos, e podem ser utilizados para mudar alguns dos parâmetros da rede de forma a controlar o nível de tensão e os fluxos de potências ativa e reativa. Desta forma, podendo eliminar alguns problemas de fluxo na malha, proporcionando um melhor funcionamento do sistema. Essas mudanças são feitas nas características da rede, como nos ângulos de defasagem e, amplitudes das tensões quanto na impedância da linha (GERBEX; CHERKAOUI; GERMOND, 2003).

As Leis de Kirchhoff definem o fluxo de potência de um sistema em CA. O fluxo de malha é o fluxo que se forma entre dois sistemas interligados através de uma malha fechada, sendo formado pela diferença entre o fluxo de potência também conhecido como fluxo livre e o fluxo desejado. Os fluxos de malha podem ser capazes de suprir sua própria carga porém fazendo com que o sistema seja mal utilizado (GERBEX; CHERKAOUI; GERMOND, 2003).

Na Figura 3, mostra-se o fluxo de potência versus ângulo, associado-o aos diferentes tipos de controles que podem ser exercidos pelos dispositivos FACTS mais difundidos. As siglas usadas são: SVC - Static Var Compensator (Compensador Estático de Reativos), TCPST - Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer (Transformador Defasador Controlado a Tiristor) TCSC - Thyristor Controlled Series Capacitor (Capacitor Série Controlado a Tiristor) (MACHADO et al., 2003).

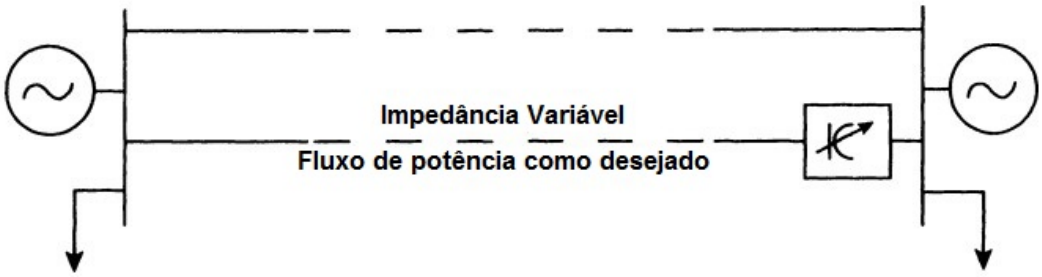
Figura 3 – Controle do fluxo de potência ativa exercido por dispositivos FACTS.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

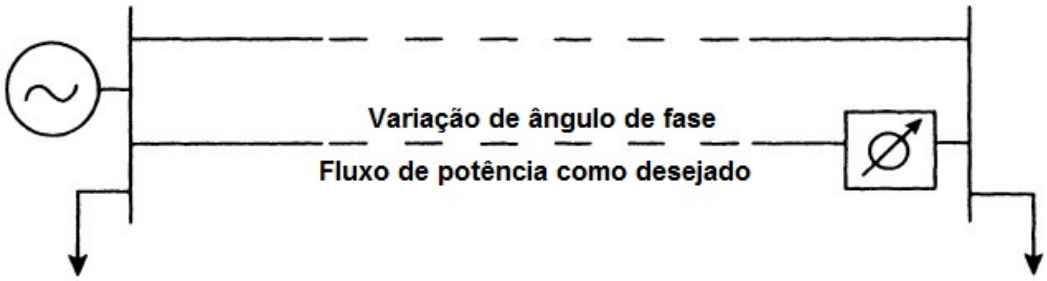
Como pode-se observar, as Figuras 4 e 5 mostram linhas de transmissão com dois diferentes tipos de FACTS. Estes controlam a impedância da linha ou o ângulo de fase. Um controlador FACTS é capaz de controlar o fluxo de potência conforme necessário (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Figura 4 – Fluxo de Potência controlado com Impedância Variável.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Figura 5 – Fluxo de Potência controlado com ângulo de fase variável.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

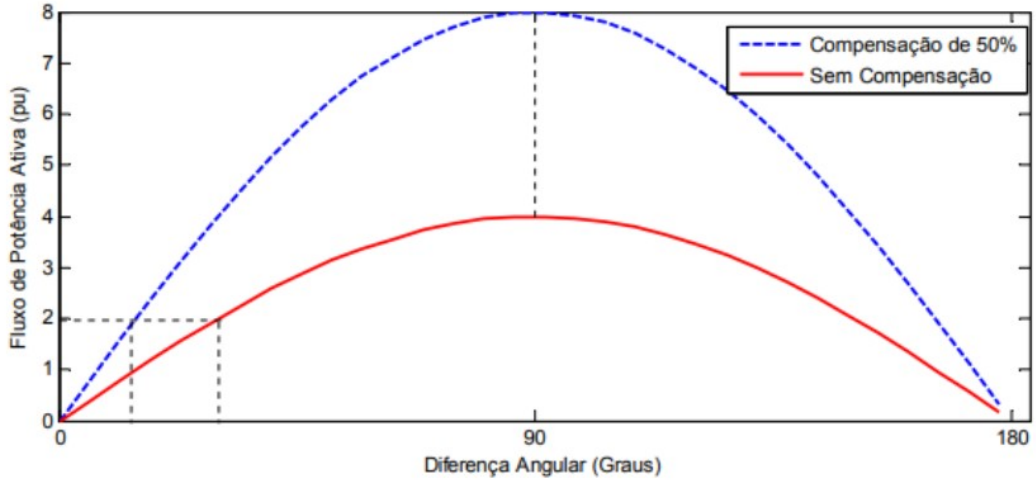
2.2.2 Compensação Serie: Exemplo de ganho no fluxo de potência.

Compensadores podem ser conectados em um sistema de transmissão de duas formas básicas diferentes, sendo uma a conexão *shunt* e outra a conexão série. Uma compensação série se trata de uma impedância variável, como capacitor ou reator, ou também uma fonte variável baseada em eletrônica de potência conectada em série no circuito da linha de transmissão, para atender a necessidade de compensação desejada. Esse tipo de compensação é utilizado pela necessidade de otimizar o fluxo de potência da linha de transmissão (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

O comportamento do fluxo de potência ativa na linha de transmissão pode ser visto na Figura 5. Para uma faixa angular de 0 a 180 graus, os efeitos de um sistema sem compensação podem ser comparados com uma compensação de 50% do valor de reatância da linha original (FURINI, 2008).

Através da Figura 6 é mostrado que a compensação aumenta a capacidade de transmissão da linha em 100% . Outro aspecto importante e desejado é que para um dado valor de fluxo de potência ativa, a margem de estabilidade de ângulo aumente consideravelmente após a compensação (FURINI, 2008).

Figura 6 – Fluxo de Potência com e sem compensação.



Fonte: (MIASAKI, 2006).

2.2.3 Limitação na capacidade de carga numa linha de transmissão

As linhas de transmissão estão sujeitas à limites térmicos, dielétricos e de estabilidade, estes que restringem a quantidade de potência que pode ser transmitida com segurança pela linha de transmissão. Tais limites possuem o potencial de criar pontos de congestionamento na rede de transmissão. Os pontos de congestionamento não são estáticos e se modificam de acordo com as alterações nos fluxos de potência resultantes do despacho de geração, das características da carga e das contingências (LIMA, 2020).

Levando em consideração que as propriedades não são um problema, o objetivo principal é maximizar a transmissão, melhorando a capacidade de carga sem extrapolar as condições de contingência. Sendo assim, existem três tipos de limitações:

- A. Térmica
- B. Dielétrica
- C. Estabilidade

2.2.3.1 Limitação Térmica

Nos últimos anos, o aumento do consumo de energia elétrica não foi acompanhado pela construção de novas linhas de transmissão. Para que a demanda de energia fosse suprida

de imediato, uma das alternativas das concessionárias é trazer o regime de operação das linhas de transmissão existentes para o mais próximo dos seus limites de capacidade de carga. Isso tudo sem colocar em risco a confiabilidade operacional e a integridade física dos equipamentos e componentes (SILVA, 2008).

A determinação dos limites de carregamento é baseado sempre na corrente da linha, supondo determinadas condições ambientais fixas, de modo a atingir a temperatura de projeto nas condições normais e também durante emergências. Quando a corrente alcança os valores superiores, tem-se o que se chama ampacidade da linha de transmissão, o que significa que esta é sua capacidade máxima de suportar corrente elétrica por longos períodos de duração perante condições ambientais específicas (SILVA, 2008).

A limitação térmica é uma propriedade que depende da temperatura ambiente, condições de vento, estado do condutor e distancia do solo. Devido ao ambiente que sofre mudanças e também ao carregamento histórico. O valor nominal é decidido de forma conservadora tendo em vista o cenário de pior caso histórico do ambiente. Existem *softwares off-line* capazes de calcular a capacidade de carga da linha com base no histórico recente e do ambiente disponível (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Eventualmente as linhas de transmissão podem operar no regime de emergência, com sobrecarga, e esse fator é previsto durante o projeto de construção das linhas de transmissão. Porém a operação em sobrecarga não deve ser utilizada com frequência. Os limites de operação normal e de emergência variam de cada país e de modo geral, o limite de temperatura para que não haja degradação do material durante o regime permanente varia pelo tipo de condutor utilizado na linha (SILVA, 2008).

2.2.3.2 Limitações Dielétricas

Os dielétricos são materiais isolantes que sofrem polarização ao serem sujeitados a grandes intensidades de campo elétrico. Em linhas de transmissão, eles são utilizados nas estruturas para que a transmissão possa ocorrer de forma segura sem que ocorram problemas de curto-circuitos (CALLISTER; RETHWISCH, 2000).

Porém, esses materiais possuem uma capacidade máxima de resistir contra a passagem de corrente elétrica e esse fenômeno é chamado ruptura da rigidez dielétrica. A ruptura acontece quando o campo elétrico externo é grande o suficiente para que o material perca sua capacidade de isolação e torna-se condutor de corrente elétrica. Processo este que é geralmente violento e produz uma quantidade enorme de calor e pode causar danos

irreversíveis no material (CALLISTER; RETHWISCH, 2000).

Do ponto de vista do isolamento, a maioria das linhas são projetadas de forma conservadora. Para uma dada tensão nominal, muitas vezes é possível aumentar a operação normal por tensão +10% (ou seja, 500 kV-550 kV) ou mesmo superior. O cuidado é necessário para garantir que a dinâmica e sobretensões transitórias estejam dentro dos limites. Equipamentos como para-raios, ou isoladores de linha com para-raios internos, ou poderosos tiristores supressores de sobretensão nas subestações podem permitir aumento significativo da capacidade de tensão de linha e subestação. A tecnologia FACTS pode ser usada para garantir condições de sobretensão e fluxos de potência aceitáveis (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

2.2.3.3 Limitação de Estabilidade

A capacidade de condução de carga está diretamente ligada aos parâmetros de construção da linha de transmissão conforme mostrado nos tópicos anteriores. Além disso, é necessário prever como o sistema reage quando a estabilidade do mesmo é botada à prova. Assim, quando a linha de transmissão é projetada, também leva-se em consideração as possíveis manobras que o sistema pode sofrer, além das contingências que a linha está suscetível (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Existem um número de problemas de estabilidade que podem limitar a capacidade de transmissão de uma linha. Sendo esses (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000):

- Estabilidade Transitória:

  A estabilidade transitória indica a capacidade do sistema de potência de se recuperar após um distúrbio elevado, como uma falta severa em uma linha de transmissão com bastante carga. Portanto, a estabilidade transitória se torna uma característica que limita a capacidade de carga, tendo em vista a recuperação do sistema perante contingências de grande porte (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

- Estabilidade Dinâmica:

  A estabilidade dinâmica é a capacidade da linha de transmissão de amortecer pequenas oscilações de potência como as alterações momentâneas das grandezas elétricas. Portanto, a estabilidade dinâmica é um limitador da capacidade de carga, tendo em vista a qualidade do sistema como um todo, garantindo que o sistema opere de forma ótima (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

- Colapso de Frequência:

  Até certo ponto, o sistema elétrico é capaz de se auto regular, porém quando a geração não é capaz de suprir a carga, acaba existindo um afundamento de tensão e frequência do sistema. Portanto, quando o sistema não é capaz de se regular, a frequência continua caindo levando o sistema ao colapso, sendo assim um limitador da capacidade de carga (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

- Colapso de Tensão:

  De maneira análoga ao colapso de frequência, o afundamento de tensão proveniente do excesso de carregamento do sistema pode levar o sistema ao colapso tornando-se assim um limitador da capacidade de carga (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

- Ressonância Subsíncrona:

  A ressonância subsíncrona é definida como uma condição em que o sistema elétrico da linha de transmissão troca energia com o sistema mecânico do conjunto de geração (gerador e turbina) em uma ou mais de suas frequências naturais, abaixo da frequência síncrona do sistema elétrico (FERREIRA; SILVEIRA; LUIZ, 2020).

  Quando o sistema de potência é afetado por perturbações, correntes elétricas de baixa frequência são geradas no estator das unidades geradoras devido à troca de energia entre as impedâncias do sistema. Este problema se manifesta de duas formas, sendo elas a auto-excitação e os conjugados transitórios (FERREIRA; SILVEIRA; LUIZ, 2020).

  - Auto-Excitação:

    Existem dois tipos de auto-excitação, o primeiro envolve apenas a dinâmica elétrica do rotor e é denominado gerador de indução, enquanto o segundo envolve a dinâmica elétrica e mecânica do rotor e é chamado de interação torcional (PADIYAR, 2007).

    * Efeito Gerador de Indução:
      O efeito do gerador de indução se dá pela aparição de um escorregamento negativo no rotor proveniente das correntes subsíncronas da armadura, operação semelhante ao do gerador de indução. Sob esta condição, o sistema fica auto-excitado e provoca oscilações de tensão e corrente com amplitudes crescentes no tempo (FERREIRA; SILVEIRA; LUIZ, 2020).
    * Interação Torcional:
      A interação torcional acontece devido ao acoplamento do sistema mecânico à máquina geradora por meio de um eixo. A combinação das frequências naturais de oscilação com a ressonância subsíncrona fazem com que conjugados eletromagnéticos sejam induzidos amplificando as oscilações originais,

causando assim a auto-excitação. Em geral, este fenômeno pode reduzir a vida útil ou até destruir o eixo de acoplamento do sistema (FERREIRA; SILVEIRA; LUIZ, 2020).

– Conjugados transitórios:

  Devido ao fenômeno da ressonância subsíncrona, os componentes de frequência subsíncrona do torque no rotor do gerador podem ter grandes amplitudes no instante após a perturbação. Cada vez que ocorre um desses torques transitórios de alta amplitude, pode resultar na redução de vida útil do eixo devido a danos por fadiga. Fadiga pode ser definida como sendo o processo de mudança estrutural permanente, localizada e progressiva, que ocorre em um material que está sujeito a condições que produzem tensões, deformações e rachaduras (PADIYAR, 2007).

2.3 Tecnologias FACTS

2.3.1 Definição

O acrônimo FACTS provém do inglês "*Flexible AC Transmission System*", ou seja, "Sistemas de Transmissão de Corrente Alternada Flexíveis" e o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) define FACTS como "Sistemas de transmissão de corrente alternada que incorporam controladores baseados em eletrônica de potência e mais outros controladores estáticos, para melhorar a controlabilidade e aumentar a capacidade de transferência de potência" (EDRIS, 1997).

Em 1988, o conceito FACTS foi apresentado por Hingorani, quando o mesmo publicou o artigo "*Power Electronics in Electric Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems*" que propôs o uso da eletrônica de potência para o controle de sistemas de potência de corrente alternada. O que Hingorani propôs era a ideia de um sistema flexível em corrente alternada como no caso do sistema de transmissão HVDC ("*High Voltage Direct Current*"). No texto, Hingorani cita o uso de transistores de potência, assim como o desenvolvimento de novos dispositivos semicondutores, tais como: GTO ("*Gate Turn-off Thyristor*") e MCT ("*MOS-Controlled Thyristor*") (HINGORANI, 1988).

O emprego de dispositivos FACTS é um meio de estender a capacidade das redes de transmissão de potência sem a necessidade de introduzir, por exemplo, novas linhas de transmissão. Isto porque esses dispositivos introduzem novos graus de liberdade na operação

dos sistemas de potência por permitirem o ajuste independente de certas variáveis do sistema (MACHADO et al., 2003).

Do ponto de vista da indústria de energia elétrica, para que os FACTS sejam cada vez mais aceitos, esta controlabilidade adicional, se comparada às alternativas convencionais para expansão da transmissão ou da geração, deve levar a um aumento dos benefícios econômicos (MACHADO et al., 2003).

Os controladores FACTS podem ser aplicados em série ou em paralelo, de forma individual, ou em conjunto com outros controladores graças a sua flexibilidade. Eles possuem uma resposta rápida e permitem uma conexão com os parâmetros no sistema de operação, como: corrente, tensão, ângulo de fase, impedâncias série e *shunt* (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Os equipamentos FACTS são eficazes inclusive na estabilidade dos sistemas de potência, pois entrega um nível de liberdade devido a capacidade de aumentar o limite de transferência de energia, enfrentando grandes perturbações no sistema. Também sendo úteis na estabilidade dinâmica, frente à pequenas perturbações, amortecendo as oscilações do sistema (MACHADO et al., 2003).

2.3.2 Uso de FACTS

Problemas ambientais e restrições econômicas têm tornado a operação e o planejamento dos sistemas elétricos cada vez mais complexos. Além deste problema, a descentralização dos sistemas elétricos também trouxe novos elementos de análise, já que o sistema foi dividido, portanto a competição entre as empresas estabeleceu novos paradigmas em relação à operação e ao planejamento desses sistemas. Ganham importância, técnicas de análise que reduzem os custos de investimento sem que condições operativas fossem comprometidas. Entre estas alternativas, encontra-se o uso de FACTS no sistema elétrico (LIMA, 2016).

O que torna mais interessante para projetistas planejadores de linha de transmissão é que a tecnologia FACTS abre oportunidades novas para controlar a potência e aumentar a capacidade utilizável de linhas existentes, bem como novas e atualizadas. A capacidade de controlar corrente através de um linha a um custo razoável permite um grande potencial de aumentar a capacidade das linhas existentes, e uso de um dos Controladores FACTS permite que a energia flua através dessas linhas em condições normais e de contingência (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Essas oportunidades surgem pela capacidade dos Controladores FACTS de controlarem os parâmetros que regem a operação dos sistemas de transmissão, incluindo impedâncias em série e derivação, corrente, tensão, ângulo de fase e o amortecimento de oscilações em várias frequências abaixo da frequência nominal. Fornecendo flexibilidade, os controladores FACTS tem capacidade de permitir que uma linha transporte energia de forma mais próxima de sua classificação térmica (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

A tecnologia FACTS não se faz em um único controlador de alta potência, mas sim um leque de controladores, que podem ser utilizados individualmente ou em conjunto com outros controladores, para controlar um ou mais dos parâmetros do sistema. Um Controlador FACTS bem escolhido pode superar as limitações específicas de uma determinada linha de transmissão. Já que todos os controladores FACTS representam aplicações de tecnologia básica e sua produção pode eventualmente aproveitar tecnologias comerciais de escala. Da mesma forma que o transistor é o elemento básico para toda uma variedade de chips e circuitos microeletrônicos, o tiristor ou transistor de alta potência é o elemento para uma variedade de controladores eletrônicos de alta potência (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

A tecnologia FACTS permite estender os limites de transmissão utilizáveis em uma maneira proporcional aos investimentos incrementais e em quando necessário. Porém, à medida que a tecnologia dos dispositivos semicondutores de potência progrida, o custo dos Controladores FACTS por consequência diminuirá. Sendo assim, o uso em grande escala da tecnologia FACTS é garantido (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

2.3.3 Vantagens dos Sistemas Flexibilizados com FACTS

O estabelecimento do conceito de FACTS contribuiu por mostrar o enorme potencial que existe na aplicação da eletrônica de potência na expansão dos sistemas elétricos de potência, e assim, organizando novas ideias, as tornando realidade permitindo uma flexibilização do sistema como um todo a fim de mantê-lo sempre otimizado. A tecnologia FACTS proporciona novas oportunidades para o controle de potência e possibilita o aumento da capacidade de utilização do sistema de transmissão atual existente, possibilitando a estes dispositivos características, tais como (MACHADO et al., 2003):

- O controle direto do fluxo de potência por rotas de transmissão, que pode ser necessário por questões contratuais das operadoras, saúde do sistema, ou até pode ser por necessidade de remanejar potência em momentos de emergência (HINGORANI;

GYUGYI et al., 2000);

- Estender os limites de transferência de potência nas redes de transmissão, podendo elevar o carregamento até a sua capacidade térmica, levando em conta os prazos e sazonalidades além das condições ambientais e histórico de carregamento (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000);
- Aumentar a segurança do sistema aumentando o limite de estabilidade transitória, além da limitação das correntes de curto-circuito e sobrecargas, gerenciamento de *blackouts* e amortecimento de oscilações eletromecânicas de sistemas e máquinas (MACHADO et al., 2003);
- Fornecer condições seguras para linhas que interligam regiões e usinas de geração próximas, podendo reduzir assim a necessidade de manter uma reserva de geração de ambos os lados (MACHADO et al., 2003);
- Maior flexibilidade de localização na construção de novas usinas de geração (MACHADO et al., 2003);
- Repotencializar linhas de transmissão existentes (SUTANTO; LACHS, 1993);
- Reduzir o fluxo de potência reativa (MACHADO et al., 2003);
- Reduzir fluxos de laço circulantes no sistema (MACHADO et al., 2003);
- Reduzir o custo de geração (MACHADO et al., 2003).

2.4 Tipos de classificações de controladores FACTS

Nessa sessão são mostradas algumas formas de classificar os dispositivos FACTS a fim de permitir uma análise dos dispositivos através de suas características fundamentais, proporcionando assim uma melhor visão dos compensadores. As classificações separam os compensadores de forma mais adequada de acordo com a forma de conexão com a linha de transmissão, com a geração que foi desenvolvida e quanto a forma de operação.

2.4.1 Classificação de categoria dos controladores

Essa classificação é fundamental para o entendimento dos dispositivos FACTS, pois classificá-las conforme a ligação permite entender melhor a forma que esses compensadores irão atuar no sistema de potência de modo a ajudar no controle de fluxo de potência

e na utilização, de forma eficiente, da rede instalada, podendo caracterizar injeções de tensão ou corrente através de impedâncias variáveis. Essa classificação é dividida em dois grupos, os compensadores *shunt* e os compensadores série. Alguns exemplos de cada um são apresentados nas subseções a seguir.

2.4.1.1 Controladores *Shunt*

Os controladores *Shunt*, assim como os controladores Série, são caracterizados por sua conexão com a linha de transmissão. Em princípio, todos os controladores *Shunt* injetam corrente no sistema no ponto de conexão. Pode-se caracterizar como controladores *Shunt* os seguintes compensadores:

- Compensador Síncrono Estático (*Static Synchronous Compensator* - STATCOM);
- Compensador Estático de Reativos (*Statis Var Compensator* - SVC);
- Reator Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR);
- Reator Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Reactor* - TSR);
- Capacitor Chaveador a Tiristor (*Thyristor Switched Capacitor* - TSC);
- Gerador Estático de Reativo (*Static Var Generator* - SVG)

2.4.1.2 Controladores Série

Os controladores Série, assim como os controladores *Shunt*, são caracterizados por sua conexão com a linha de transmissão. Em princípio, todos os controladores Série injetam tensão em série com a linha. Pode-se caracterizar como controladores série os seguintes compensadores:

- Compensador Síncrono Estático em Série (*Static Synchronous Series Compensator* - SSSC);
- Capacitor Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor* - TCSC);
- Capacitor Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* - TSSC);

- Reator Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Reactor* - TCSR);
- Reator Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Reactor* - TSSR).

2.4.1.3 Controladores Séries-*Shunt*

A união de controladores *shunt* e série podem ser realizadas com o intuito de maximizar o controle do fluxo de potência de um sistema. Essa junção traz consigo a necessidade de criar uma classificação especial para esse dispositivo, sendo ele:

- Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller* - UPFC).

2.4.2 Classificação quanto à geração dos controladores

A classificação quanto a geração é importante para descrever estes equipamentos. Ela mostra os tipos de FACTS de acordo com a tecnologia que são utilizadas nos dispositivos, fazendo um paralelo ao desenvolvimento de tecnologia ao decorrer do tempo. São separadas em quatro gerações, onde nas duas primeiras gerações são separadas em *shunt* e série pelos motivos citados no parágrafo anterior. A seguir são apresentadas as gerações e alguns exemplos de FACTS.

2.4.2.1 Primeira Geração

A primeira geração de dispositivos FACTS estão os equipamentos que utilizam tiristores e chaves semicondutoras (FILHO, 2005). Separados em *shunt* e série conforme mostrado exemplos a seguir:

2.4.2.1.1 Conexão *Shunt*

- Compensador Estático de Reativos (*Statis Var Compensator* - SVC);
- Reator Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR);
- Reator Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Reactor* - TSR);
- Capacitor Chaveador a Tiristor (*Thyristor Switched Capacitor* - TSC).

2.4.2.1.2 Conexão Série

- Capacitor Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor* - TCSC);
- Capacitor Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* - TSSC);
- Reator Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Reactor* - TSSR).

2.4.2.2 Segunda Geração

A segunda geração de dispositivos FACTS estão os equipamentos que utilizam tiristores tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ou GTO (*Gate Turn Off Thyristor*) (FILHO, 2005). Também dividida em *shunt* e série, apresentados exemplos a seguir:

2.4.2.2.1 Conexão *Shunt*

- Compensador Síncrono Estático (*Static Synchronous Compensator* - STATCOM).

2.4.2.2.2 Conexão Série

- Compensador Síncrono Estático em Série (*Static Synchronous Series Compensator* - SSSC);
- Reator Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Reactor* - TCSR).

2.4.2.3 Terceira Geração

A terceira geração de dispositivos FACTS é formada pela integração de equipamentos *shunt* e série em uma mesma linha de transmissão, tendo como exemplo (FILHO, 2005):

- Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller* - UPFC).

2.4.2.4 Quarta Geração

Uma quarta geração de dispositivos FACTS é composta pela integração dos equipamentos série e *shunt em linhas diferentes*. Isto resulta em equipamentos com os nomes IPFC (*Interline Power Flow Controller*), CSC (*Convertible Static Compensator*) e outras possibilidades (FILHO, 2005).

2.4.3 Classificação de Chaveamento, Controle e Avançados

Essa classificação é especial pois mostra cada tipo de compensador de acordo com o funcionamento de suas chaves semicondutoras em conjunto com elementos básicos como capacitores e reatores. Através dessa classificação é simples entender o paralelo entre a evolução das FACTS e o desenvolvimento de tecnologias de controle e automação, e podem ser classificados como compensadores chaveados, controlados ou avançados, como mostrado nas subseções a seguir.

2.4.3.1 Controladores FACTS Chaveados

Estes compensadores podem ser conectados em derivação, para promover compensação de tensão, ou em série com a linha, para controlar o fluxo de potência e ou ângulo de defasagem, são estes (FILHO, 2005):

- Reator Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Reactor* - TSR);
- Capacitor Chaveador a Tiristor (*Thyristor Switched Capacitor* - TSC);
- Capacitor Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Capacitor* - TSSC);
- Reator Série Chaveado a Tiristor (*Thyristor Switched Series Reactor* - TSSR).

2.4.3.2 Controladores FACTS Controlados

Neste grupo de controladores, a inserção de potência reativa para compensação se dá de maneira suave, ao contrário dos controladores FACTS chaveados, onde a inserção de reativos se dá em blocos, são estes (FILHO, 2005):

- Compensador Estático de Reativos (*Statis Var Compensator* - SVC);
- Reator Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Reactor* - TCR);
- Capacitor Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Capacitor* - TCSC);
- Reator Série Controlado a Tiristor (*Thyristor Controlled Series Reactor* - TCSR);

2.4.3.3 Controladores FACTS Avançados

São controladores baseados na utilização de conversores como fonte de tensão VSC – (*Voltage Source Converter*) para realizar a compensação de potência reativa, ao invés dos tradicionais elementos passivos (reatores e capacitores). Possuem também a habilidade de compensar potência ativa, são estes (FILHO, 2005):

- Compensador Síncrono Estático (*Static Synchronous Compensator* - STATCOM);
- Compensador Síncrono Estático em Série (*Static Synchronous Series Compensator* - SSSC);
- Controlador Unificado de Fluxo de Potência (*Unified Power Flow Controller* - UPFC).

2.5 Tipos de Conexão de dispositivos FACTS no sistema de potência

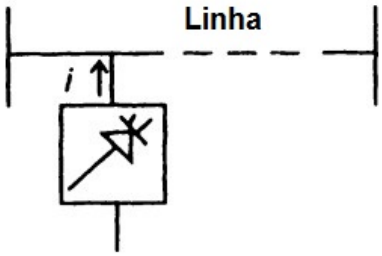
Conforme mostrado anteriormente, os dispositivos FACTS são classificados de acordo com o tipo de ligação que os mesmos fazem com o sistema de potência. Sendo assim, esta seção descreve as conexões *shunt* e série mostradas nas subseções a seguir.

2.5.1 Conexão *shunt*

Os controladores *shunt* podem ser de impedância variável, fonte variável ou uma combinação destes elementos. Em princípio, todos os controladores *shunt* injetam corrente no sistema no ponto de conexão. Mesmo uma impedância de derivação variável conectada à tensão de linha causa um fluxo de corrente e, portanto, representa a injeção de corrente na linha. Contanto que a corrente injetada esteja em quadratura de fase com a tensão de linha, o controlador *shunt* apenas fornece ou consome potência reativa variável. Qualquer outra

relação de fase envolverá manipulação de potência ativa também (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000). A Figura 7 a seguir mostra um exemplo de ligação *shunt* com a linha de transmissão.

Figura 7 – Conexão *shunt*.



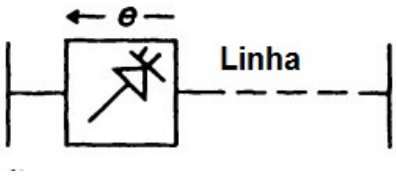
Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

2.5.2 Conexão série

Um controlador série pode ser uma impedância variável, como capacitor ou reator, ou também uma fonte variável baseada em eletrônica de potência de frequência principal, frequências subsíncronas e harmônicas, ou uma combinação das mesmas, para atender a necessidade desejada (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Em princípio, todos os controladores série injetam tensão em série com a linha. Mesmo uma impedância variável multiplicada pelo fluxo de corrente através dela, representa uma tensão em série injetada na linha. Enquanto a tensão de quadratura estiver em fase com a corrente de linha, o Controlador série apenas fornece ou consome reativos variáveis de potência. Qualquer outra relação de fase também envolverá a manipulação da potência ativa (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000). A Figura 8 a seguir apresenta um exemplo de conexão de controladores série em uma linha de transmissão.

Figura 8 – Conexão Série.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

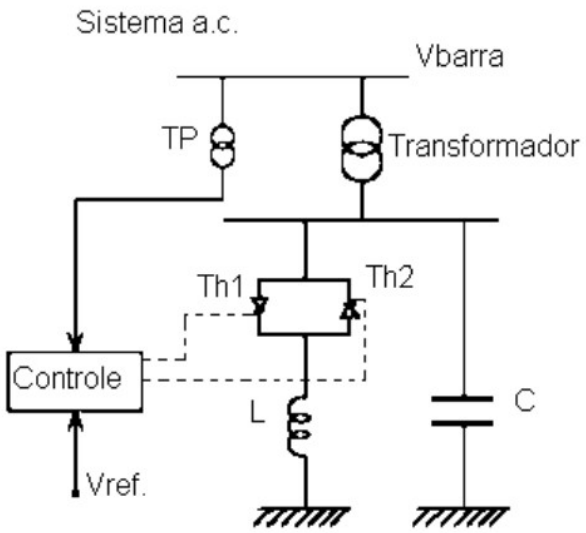
2.6 Apresentação de dispositivos FACTS

Anteriormente foram citados os tipos de compensadores FACTS e como eles podem ser classificados. Nesta seção são apresentados como de fato esses compensadores apresentados em seções anteriores funcionam, a fim de permitir um compreendimento mais completo sobre o sistema além de um entendimento completo sobre seus funcionamentos na prática.

2.6.1 SVC - *Static Var Compensator*

Os compensadores SVC são equipamentos que geram ou absorvem potência reativa com controle externo (tiristores), conectado em *shunt*, cuja saída é ajustada para o intercâmbio de corrente capacitiva ou indutiva para manter o controle de parâmetros específicos do sistema de energia elétrica, tipicamente tensão de barra (FOGAÇA, 2006). Os compensadores estáticos de reativos utilizam elementos passivos, tais como reatores e capacitores, que são devidamente ajustados de modo a realizar a compensação reativa desejada. Um controle dinâmico é necessário para este tipo de compensação. Desta forma, dispositivos eletrônicos de potência, como os tiristores, são utilizados para executar o controle necessário, já que estes possibilitam o controle da corrente que flui pelo reator, controlando a potência reativa. Os SVCs são caracterizados por uma rápida resposta, alta confiabilidade, flexibilidade e baixo custo de operação (FILHO, 2005). Na Figura 9 a seguir é apresentado um exemplo de ligação de controladores SVC.

Figura 9 – Circuito SVC.



Fonte: (FILHO, 2005).

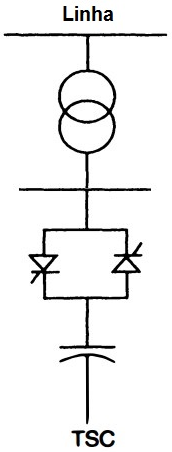
2.6.2 TSC - *Thyristor Switched Capacitor*

Um controlador TSC pode ser visto como um capacitor *shunt* chaveado por tiristores cuja reatância efetiva é variada de maneira gradual por uma operação de condução completa ou condução zero do tiristor (FOGAÇA, 2006).

O TSC também é um subconjunto do SVC em que os interruptores baseados em tiristores são usado para ligar e desligar (sem controle do ângulo de disparo) unidades de capacitores *shunt*, para alcançar a mudança de etapa necessária na potência reativa fornecida ao sistema. E ao contrário dos reatores *shunt*, os capacitores *shunt* não podem ser comutados continuamente com controle do ângulo de disparo (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

O chaveamento do capacitor é feito quando a tensão na barra passar por zero, com a finalidade de evitar sobre correntes de chaveamento nos tiristores. Outra característica é que, como o chaveamento é feito em baixa frequência, os harmônicos gerados não representam um problema importante para o sistema. Assim, esta solução TSC consiste em se selecionar o valor da capacitância através do chaveamento de blocos de capacitores, de acordo com a necessidade do sistema (FILHO, 2005). A Figura 10 mostra um exemplo de conexão de controladores TSC com a linha de transmissão.

Figura 10 – Circuito TSC.



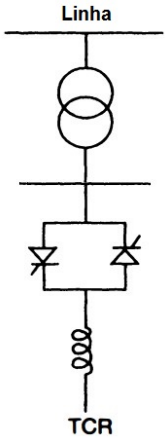
Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

2.6.3 TCR - *Thyristor Controller Reactor*

Um controlador TCR pode ser visto como um indutor *shunt* controlado por tiristores cuja reatância efetiva é variada de uma maneira contínua por controle de condução parcial do tiristor (FOGAÇA, 2006).

O controlador TCR é a base do controlador SVC (*Static Var Compensator*), e através do controle de condução pelo ângulo de disparo dos tiristores, produz uma reatância equivalente indutiva que pode variar de forma contínua. Esse controle através do chaveamento dos tiristores produz correntes harmônicas ímpares de baixa ordem, portanto medidas de prevenção precisam ser tomadas para que o sistema não receba essas componentes harmônicas, resultando em instalação de filtros passivos e na utilização de transformadores delta-estrela reduzindo os harmônicos para valores razoáveis (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000). A Figura 11 a seguir mostra um exemplo de ligação dos controladores TCR com a linha de transmissão.

Figura 11 – Circuito TCR.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

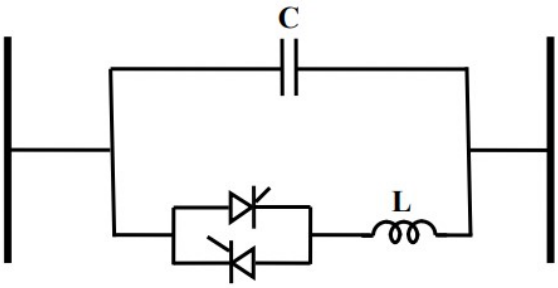
2.6.4 TCSC - *Thyritos Controlled Series Capacitor*

O controlador TCSC pode ser visto como um compensador de potência reativa capacitiva o qual consiste de um banco de capacitores série em paralelo com reator controlado por tiristores a fim de compensar a reatância capacitiva série (FOGAÇA, 2006).

Neste compensador, o valor da reatância série pode ser controlado continuamente através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores. Este circuito é semelhante ao do compensador estático convencional em derivação, SVC, embora conectado em série com a linha de transmissão (FILHO, 2005).

Como a tecnologia dos tiristores de potência é bem dominada, este é um dispositivo de alta confiabilidade e é possível dizer que o TCSC será um controlador FACTS largamente empregado nos sistemas de potência (FILHO, 2005). A Figura 12 A seguir mostra um exemplo de ligação dos controladores TCSC.

Figura 12 – Circuito TCSC.



Fonte: (ALMADA, 2012).

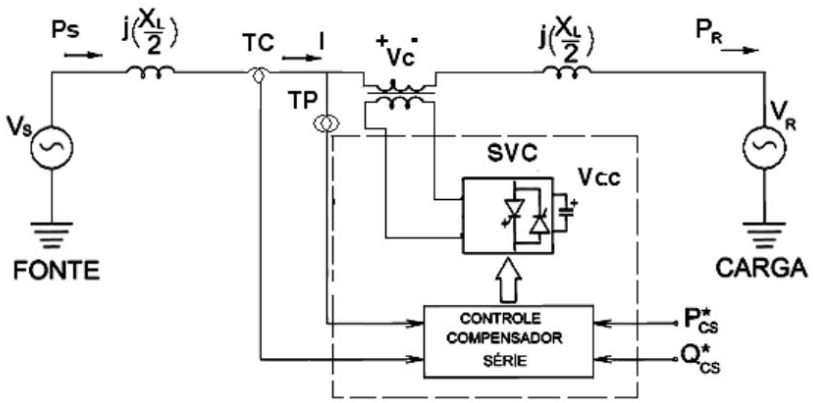
2.6.5 SSSC - *Static Syncronous Series Compensator*

O SSSC é um compensador semelhante ao STATCOM. Ele utiliza um conversor como fonte de tensão síncrona, que gera uma tensão de compensação que é inserida em série com a linha de transmissão, sem depender da corrente de linha, para incrementar ou diminuir a queda de tensão reativa. Este compensador oferece uma alternativa à compensação série convencional de linhas de transmissão (FILHO, 2005).

Funcionalmente, o SSSC pode ser considerado como um gerador ideal, que pode produzir um conjunto de tensões alternadas, trifásicas e equilibradas à frequência fundamental, com amplitude e ângulo de fase controlável. Assim, o SSSC pode gerar ou absorver potências ativa e reativa, dependendo do ângulo entre a tensão inserida em série com a linha de transmissão e a corrente da linha.

O SSSC pode operar nas potências ativa e reativa do sistema de corrente alternada, partindo do controle do módulo e do ângulo da tensão injetada com relação a corrente na linha (FILHO, 2005). A Figura 13 A seguir mostra um exemplo de ligação dos controladores SSSC.

Figura 13 – Circuito SSSC.



Fonte: (FILHO, 2005).

2.6.6 STATCOM - *Static Syncronous Compensator*

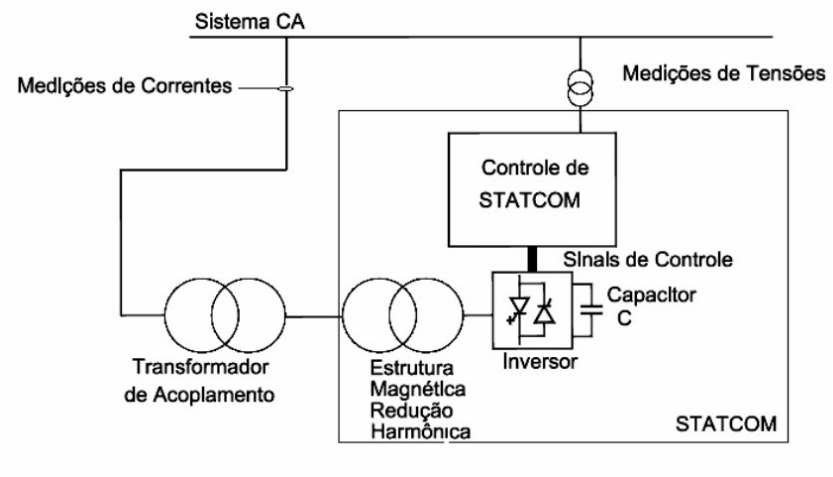
O STATCOM é conectado em paralelo com o sistema de potência, e é composto por um conversor como fonte de tensão e faz compensação de potência reativa comparando as magnitudes da tensão no ponto de acoplamento e da tensão de saída do conversor (FILHO, 2005).

Este compensador é capaz de fazer o controle do fator de potência além da regulação de tensão no ponto de conexão, além de proporcionar melhoras na estabilidade dinâmica do sistema elétrico (FILHO, 2005).

O STATCOM utiliza um capacitor e um inversor de tensão para produzir uma fonte controlada de tensões trifásicas. A estrutura básica utiliza chaves eletrônicas auto-comutadas para formar o inversor. Cada chave é composta por um GTO em anti-paralelo com um diodo, de forma que se pode bloquear a corrente apenas em um sentido. O GTO poderia ser substituído por um IGCT ou IGBT (POMILIO; DECKMANN, 2009).

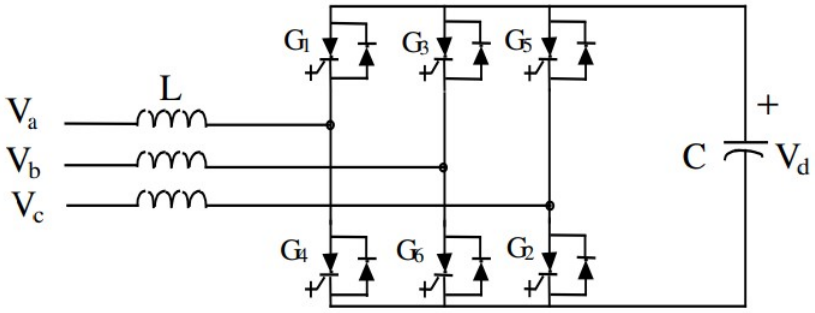
Para aplicações em sistemas de potência, a frequência de chaveamento dos interruptores disponíveis não é muito elevada, o que limita o uso de inversores PWM convencionais (de 2 níveis). Uma das soluções é utilizar conversores multiníveis. Desta forma, o nível de harmônicos é reduzido de modo a não precisar utilizar filtros (POMILIO; DECKMANN, 2009). As Figuras 14 e 15 mostram exemplos de controladores STATCOM.

Figura 14 – Circuito STATCOM.



Fonte: (FILHO, 2005).

Figura 15 – Inversor STATCOM.



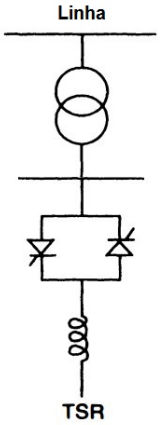
Fonte: (POMILIO; DECKMANN, 2009).

2.6.7 TSR - *Thyristor Switched Reator*

O controlador TSR é um indutor *shunt* chaveado por tiristores cuja reatância efetiva é variada de maneira gradual por uma operação de condução completa ou condução zero da válvula do tiristor (FOGAÇA, 2006).

Pode ser feito por uma sequência de indutores conectados em paralelo chaveados através de tiristores sem o controle parcial do ângulo de disparo para alcançar uma mudança na potência reativa que o sistema consome de acordo com a inserção e extração dos blocos de compensação. O uso de chaves tiristorizadas sem o controle do ângulo de disparo resulta em menores custos e perdas, mas apresenta a desvantagem de não possuir um controle contínuo (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000). A Figura 16 a seguir apresenta um exemplo de ligação de controladores TSR.

Figura 16 – Circuito TSR.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

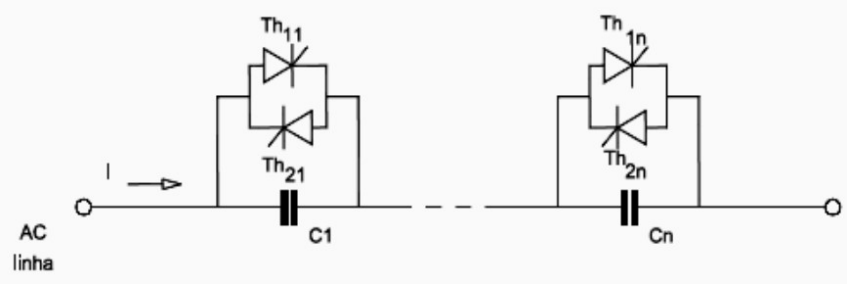
2.6.8 TSSC - *Thyristor Switched Series Capacitor*

O TSSC é um compensador reativo capacitivo, que consiste de um banco de capacitores série, em paralelo com reator chaveado por tiristores para prever gradualmente um controle da reatância capacitiva série (FOGAÇA, 2006).

O princípio de funcionamento do TSSC é simples: o grau de compensação é controlado de forma escalonada, aumentando ou diminuindo o número de capacitores em série inseridos. Um capacitor é inserido desligando a condução do tiristor, e de forma análoga, o *bypass* do capacitor é feito quando o tiristor está conduzindo (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Almejando uma compensação série regulável, embora em quantidades discretas, podem ser empregados vários módulos TSSC em série. Porém, um número de módulos excessivos pode originar ressonâncias subsíncronas. Apesar de em teoria ser possível comandar os TSSC de modo a evitar este fenômeno, o seu tempo de resposta considerável torna tal opção pouco eficaz, exceto para frequências subsíncronas bastante baixas. Por esta razão, os TSSC não são aconselháveis quando é necessário um alto nível de compensação. Podem no entanto ser empregues no controle do fluxo de potência e no amortecimento de oscilações de potência na linha, onde o seu tempo de resposta é normalmente suficiente (RODRIGUES, 2010). A Figura 17 a seguir mostra um exemplo de ligação de controladores TSSC.

Figura 17 – Circuito TSSC.



Fonte: (FILHO, 2005).

2.6.9 TCSR - *Thyristor Controlled Series Reactor* e TSSR - *Thyristor Switched Series Reactor*

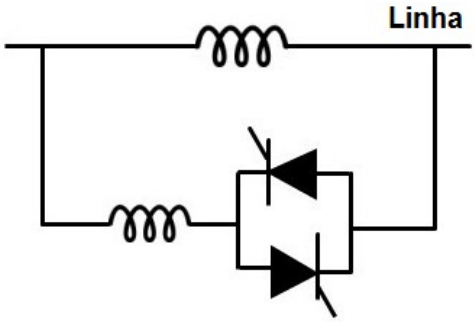
Os compensadores TCSR e TSSR são dispositivos conectados em série com a linha. São formados por uma indutância em série com a linha, além do respectivo controlador TCR ou TSR em paralelo com a indutância. Como dito nos últimos parágrafos, os controladores TCR e TSR são compensadores que possuem uma indutância controlada por tiristores. Desta forma, os compensadores TSCR e TSSR se tornam dispositivos que proporcionam uma reatância indutiva variável posicionada em série com a linha (RODRIGUES, 2010).

O TCSR é capaz de controlar a reatância indutiva da linha através do controle de ângulo de disparo dos tiristores no ramo do TCR, sendo assim, um ajuste de reatância de forma mais contínua para o sistema. Já o TSSR usa o ramo do TSR para variar a reatância, onde cada módulo funciona em dois estágios, ligado e desligado. Assim, a estrutura de controle que o TSSR possui se torna muito mais simples podendo ser economicamente mais viável comparado com o do TCSR, que entrega um controle mais aprimorado (RODRIGUES, 2010).

Um aspecto importante a se relatar é que o compensador TCSR, devido ao seu ramo TCR, é um gerador de componentes harmônicas. Uma solução viável para reduzir o problema dos harmônicos e ainda reduzir o custo é criar uma mescla dos compensadores TCSR e TSSR em um único dispositivo. A ideia é substituir um compensador TCSR de grande capacidade por vários dispositivos TSSR em conjunto com um único TCSR de menores capacidades porém tendo a mesma capacidade entre si. Funciona de forma que os TSSR entram no sistema de forma sequencial até alcançar a compensação reativa mais próxima do desejável e por fim o compensador TCSR complementa até alcançar o valor desejado, funcionando como um ajuste fino. Esse funcionamento entrega uma compensação controlada, onde a variação da reatância é dada de forma contínua e a geração de harmônicos pelo TCSR reduz de forma significativa (RODRIGUES, 2010).

Como ambos os compensadores TCSR e TSSR não são capazes de entregar uma compensação reativa capacitiva, eles não conseguem aumentar a capacidade de transmissão de uma linha. Porém, podem funcionar como limitadores de correntes de curto-circuito, aumentando a impedância total da linha. Podem condicionar os fluxos de potências ativa e reativa, além de aumentar a estabilidade transitória e dinâmica do sistema e amortecer oscilações de potência da linha de transmissão que estejam conectados (RODRIGUES, 2010). A Figura 18 a seguir mostra um exemplo de ligação de controladores TCSR e TSSR.

Figura 18 – Circuito TCSR e TSSR.



Fonte: (RODRIGUES, 2010).

2.6.10 UPFC - *Unified Power Flow Controller*

A princípio os controladores combinados série – *shunt* injetam corrente e tensão dentro do sistema. Estes elementos dos controladores vão injetar tensão na linha (parte série) e/ou corrente (parte *shunt*) de forma independente, conseguindo controlar a potência ativa e reativa. Quando os controladores são unificados, podem ter um intercâmbio de potência ativa entre os controladores via o enlace de potência (FOGAÇA, 2006).

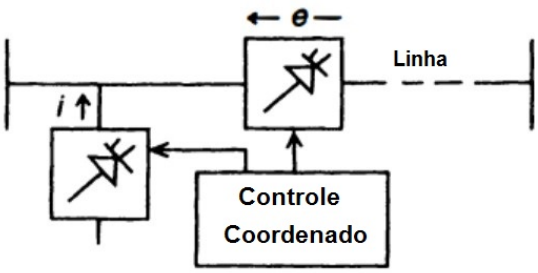
O compensador UPFC é resultado de uma combinação de um compensador estático síncrono (STATCOM) e um compensador série estático síncrono (SSSC), os quais são acoplados via enlace comum em DC, para permitir um fluxo de potência ativa entre os terminais de saída série do SSSC e terminais de saída *shunt* do STATCOM. São controlados para prover compensação concorrente de potência ativa e reativa na linha sem uma fonte de energia externa. O UPFC, pelo princípio de injeção de tensão série de forma angular não restrita, é capaz de controlar, concorrentemente ou seletivamente, a tensão, a impedância e ângulo da linha de transmissão ou alternativamente o fluxo da potência reativa na linha. O UPFC pode também prover compensação reativa *shunt* independentemente controlável (FOGAÇA, 2006).

Sistemas elétricos normalmente apresentam perturbações e estas produzem diversos pro-

blemas de operação. Problemas na regulação de tensão, desequilíbrios no carregamento das linhas de transmissão e sobrecargas devido ao paralelismo de linhas de transmissão de impedâncias diferentes são perturbações típicas e são difíceis de serem solucionadas com um único compensador tradicional, porém o uso do UPFC pode resolver ou minimizar estes problemas (FILHO, 2005).

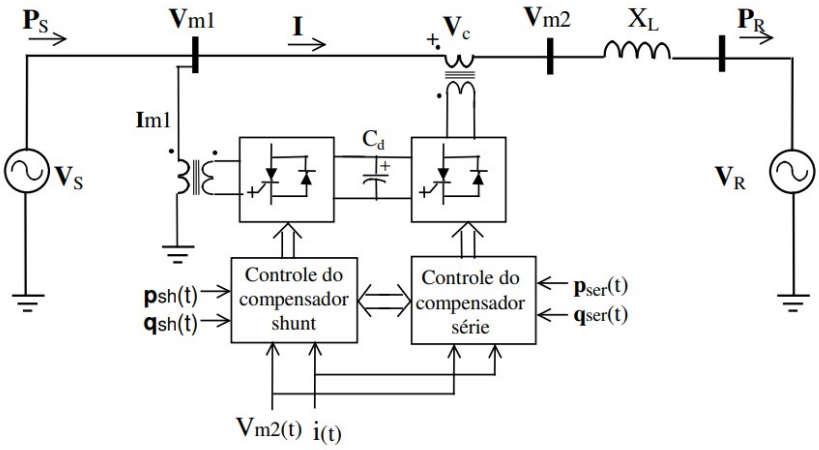
Dos benefícios da utilização dos controladores do tipo UPFC, podem ser citados a melhor utilização dos ativos dos sistemas de transmissão, o aumento da confiabilidade e disponibilidade dos sistemas de transmissão, o aumento da estabilidade dos sistemas sujeitos a transitórios, a melhoria da qualidade na entrega de potência para indústrias e os benefícios ambientais, pois evita a desapropriação de áreas, bem como desmatamentos para construção de linhas (FILHO, 2005). A Figura 19 e Figura 20 a seguir mostram exemplos de ligações de controladores UPFC.

Figura 19 – Modelo UPFC.



Fonte: (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Figura 20 – Circuito UPFC.



Fonte: (POMILIO; DECKMANN, 2009).

2.7 Dispositivos FACTS descritos por suas características de atuação

Os benefícios técnicos que os principais compensadores FACTS fornecem podem ser entendidos através da solução de problemas de operação de uma linha de transmissão. Essa operação pode ser separada em duas partes: regimes permanente e transitório. Para cada problema, existe uma solução convencional que pode ser realizada e geralmente é menos custosa do ponto de vista financeiro do que comparando com a implementação dos dispositivos FATCS. Em contrapartida estas não possuem a dinâmica encontrada nas FACTS, sendo assim, uma tarefa para os planejadores e projetistas avaliarem e chegarem à solução mais adequada para cada projeto (HABUR; O'LEARY, 2004).

Como base para comparação, são apresentadas, nas subseções a seguir, tabelas levando em consideração os problemas dos regimes permanente e transitório, onde é possível visualizar cada problema, com suas determinadas soluções convencionais e utilizando os dispositivos FACTS.

2.7.1 Soluções focadas na operação em regime permanente

Conforme citado anteriormente, sistemas de transmissão possuem problemas característicos dos regimes permanente e transitório. O regime permanente pode ser visto como o comportamento a longo prazo, de acomodação de um circuito. Ele acontece após o fim do regime transitório, quando o sistema se estabiliza. O desempenho em regime permanente é medido a partir da capacidade de um sistema seguir referências padrões e a de rejeitar assintoticamente sinais de perturbação (MELO, 2021).

Na tabela 1 são apresentados alguns problemas que venham a ocorrer na linha de transmissão, como eles são solucionados, soluções convencionais e quais FACTS podem ser usadas para resolverem os problemas.

Tabela 1 – Soluções na operação em regime permanente.

Limitações	Problemas	Ação Corretiva	Solução Convencional	Compensadores FACTS
Limites de Tensão	Baixa tensão em carregamento elevado	Fornecimento de Potência Reativa	Capacitores Shunt e Serie	SVC, TCSC, STATCOM
	Alta tensão em carregamento baixo	Retirada de Potência Reativa	Troca de Linha de Alta Tensão ou Capacitor Shunt	SVC, TCSC, STATCOM
		Absorção de Potência Reativa	Acoplamento de Capacitor Shunt ou Reator Shunt	SVC, STATCOM
	Alta tensão após interrupção	Absorção de Potência Reativa	Acoplamento de Reator Shunt	SVC, STATCOM
		Equipamento de Proteção	Acoplamento de Para-Raios	SVC
	Baixa tensão após interrupção	Fornecimento de Potência Reativa	Acoplamento de Capacitores ou Reatores em Paralelo ou Capacitores em Serie	SVC, STATCOM
		Prevenção de Sobrecarga	Reator em Série ou Regulador de Ângulo-Fase	TCSC
	Baixa tensão e Sobrecarga	Fornecimento de Potência Reativa e limitação de sobrecarga	Combinação de dois ou mais elementos	TCSC, UPFC, STATCOM, SVC
Limites Térmicos	Sobrecarga de Linha ou Transformador	Redução de Sobrecarga	Adição de Transformador ou Linha de Transmissão	TCSC, UPFC
			Adição de Reator em Série	SVC, TCSC
	Abertura de Linha de Transmissão Paralela	Limitação de carga no circuito	Adição de Reator ou Capacitor em Série	TCSC, UPFC
Fluxos Circulantes	Compartilhamento de carga por linhas paralelas	Ajuste de Reatância em Série	Adição de Reator ou Capacitor em Série	TCSC, UPFC
		Ajuste de Ângulo de Fase	Adição de Regulador de Ângulo-Fase	UPFC
	Compartilhamento Pós-Falha	Rearranjo da malha de transmissão ou ações dos limites térmicos	Regulador Ângulo-Fase e Capacitores ou Reatores em Série	TCSC, UPFC
	Inversão da Direção de Fluxo	Ajuste de Ângulo de Fase	Regulador de Ângulo-Fase	UPFC
Níveis de Curto-Circuito	Corrente de Falha do Disjuntor Excessiva	Limitação da Corrente de Curto-Circuito	Adiçao de Reatores em Série ou Instalação de Disjuntor Novo	TCSC, UPFC
		Troca de Disjuntor	Instalação de Disjuntor Novo	-
Ressância Subsíncrona	Dano no Eixo do Gerador	Redução das Oscilações	Compensação em Série	TCSC

Fonte: (HABUR; O'LEARY, 2004).

Como pode ser visto na tabela 1, os problemas dos sistemas de transmissão de regime permanente são baseados em cima das limitações das linhas de transmissão. Cada limitação proporciona um ou mais problemas que são analisados para que seja encontrada uma solução corretiva. Com a solução corretiva definida, existem diversas formas de alcançar o mesmo resultado, podendo utilizar elementos convencionais ou dispositivos de compensação FACTS.

Os dispositivos FACTS mais convencionais são o SVC, TCSC, STATCOM e o UPFC. E conforme a linha de transmissão opera, problemas podem aparecer conforme descritos na tabela 1, desta forma, é possível observar que um dispositivo compensador pode atuar

em diferentes problemas cujas soluções convencionais são completamente diferentes. Isso indica que a implementação dos compensadores FACTS pode ser viável e sua capacidade dinâmica de solucionar problemas diversos pode ser aproveitado para otimizar os sistemas de transmissão.

2.7.2 Soluções focadas na operação em regime transitório

Sistemas de transmissão possuem problemas característicos dos regimes permanente e transitório. Os sistemas elétricos estão sujeitos a diversos fenômenos transitórios, que podem ser desde as oscilações eletromecânicas de baixas frequências, até às variações rápidas de tensões e correntes que podem ser causadas por chaveamentos ou mudanças bruscas de estado (MOURA; MOURA; ROCHA, 2019).

De modo geral, a duração de um transitório é curta, porém de grande importância, uma vez que os todos os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente (MOURA; MOURA; ROCHA, 2019).

Na tabela 2 são apresentados alguns problemas que venham a ocorrer na linha de transmissão, ações corretivas, soluções convencionais e quais FACTS podem ser usadas para resolverem os problemas.

Tabela 2 – Soluções na operação em regime transitório.

Limitações	Tipo de Sistema	Ação Corretiva	Solução Convencional	Compensadores FACTS
Estabilidade Transitória	Geração Distantes - Linhas radiais Areas Interconectadas Malha de Rede Frágil	Aumento do Torque de Sincronização	Excitação de Resposta Rápida ou Capacitores em Série	TCSC, TSSC, UPFC
	Areas Interconectadas Rede Entraçada Malha de Rede Frágil	Controle Dinâmico do Fluxo de Carga	HVDC	TCSC, UPFC
Amortecimento	Geração Distantes - Linhas radiais	Amortecimento de Oscilações de 1 Hz	Excitador, Estabilizador de Sistema de Potência	SVC, STATCOM, TCSC
	Areas Interconectadas Malha de Rede Frágil	Amortecimento de Oscilações de Baixa Frequência	Estabilizador de Sistema de Potência	SVC, STATCOM, TCSC, UPFC
Controle de Tensão Pós Contigência	Geração Distantes - Linhas radiais	Suporte Dinâmico de Tensão	-	SVC, STATCOM, UPFC
	Areas Interconectadas	Controle Dinâmico de Fluxo	-	SVC, UPFC
	Malha de Rede Frágil	Suporte de Tensão e Controle de Fluxo Dinâmicos	-	SVC, TCSC, UPFC
	Geração Distantes - Linhas radiais Areas Interconectadas Rede Entraçada Malha de Rede Frágil	Redução do Impacto da Contingência	Linhas Paralelas	SVC, TCSC, STATCOM, UPFC
Estabilidade de Tensão	Areas Interconectadas	Suporte de Reativos	Capacitor Shunt ou Reator Shunt	SVC, STATCOM, UPFC
	Rede Entraçada	Ações de Controle de Malha	Mudança de Tap no Transformador, Controle de HVDC	TCSC, STATCOM, UPFC
	Malha de Rede Frágil	Controle de Geração	Excitador de Resposta Alta	-

Fonte: (HABUR; O'LEARY, 2004).

Como pode ser visto na tabela 2, os problemas dos sistemas de transmissão de regime transitório são baseados em cima das limitações das linhas de transmissão. Cada limitação provém de características dos sistemas de transmissão e estes são analisados para que seja encontrada uma solução corretiva. Com a solução corretiva definida, existem diversas formas de alcançar o mesmo resultado, podendo utilizar elementos convencionais ou dispositivos de compensação FACTS.

Uma diferença grande quando comparado com os problemas do regime permanente, alguns problemas do regime transitório não possuem soluções convencionais simples, principalmente no Controle de Tensão após contingências (HABUR; O'LEARY, 2004).

Da mesma forma que no caso dos problemas de regime permanente, os dispositivos FACTS mais convencionais são o SVC, TCSC, STATCOM e o UPFC. E conforme a linha de transmissão opera, problemas podem aparecer conforme descritos na tabela 2, desta forma, é possível observar que um dispositivo compensador pode atuar em diferentes problemas cujas soluções convencionais são completamente diferentes. Isso indica que a implementação dos compensadores FACTS pode ser viável e sua capacidade dinâmica de solucionar problemas diversos pode ser aproveitado para otimizar os sistemas de transmissão.

2.8 Dispositivos FACTS mais utilizados e suas principais funcionalidades

Conforme foi visto nos tópicos anteriores, os compensadores mais utilizados são o SVC, STATCOM, TCSC e UPFC. Na tabela 3 são apresentados os principais FACTS e suas principais funcionalidades, onde a importância de cada dispositivo foi avaliada e a quantidade de estrelas em cada quadro representa a capacidade de atuar em cima dos problemas citados.

Tabela 3 – Avaliação dos dispositivos FACTS.

	Controle de Fluxo de Carga	Controle de Tensão	Estabilidade Transitória	Estabilidade Dinâmica
SVC	★	★★★	★	★★
STATCOM	★	★★★	★★	★★
TCSC	★★	★	★★★	★★
UPFC	★★★	★★★	★★	★★

Fonte: (HABUR; O'LEARY, 2004).

Com base no conteúdo descrito até o momento, é possível descrever algumas características:

- O controle de tensão é uma característica que a maioria das FACTS é capaz de realizar, tendo uma performance ótima nesse quesito;
- O controle de fluxo de carga é melhor realizado por compensadores série, como o TCSC e o UPFC, que apesar de ser híbrido também possui uma parte de si ligada em série com a linha de transmissão;
- O compensador UPFC, de terceira geração, é o mais completo quando trata-se de utilidades. Isso se dá devido à combinação de compensação série e *shunt* de sua estrutura. Em contrapartida os custos de montagem desse equipamento é mais elevado;
- Grande parte dos compensadores FACTS são úteis de forma satisfatória quando se volta para as estabilidades transitórias e dinâmicas.

2.9 Utilização de FACTS pelo mundo

No mundo temos alguns exemplos de utilização dos compensadores FACTS nos sistemas de transmissão. Alguns exemplos podem ser vistos abaixo:

- **EUA (Subestação de Sullivan, Tennessee)**: Uso do STATCOM na compensação de linha de transmissão. Foi um marco histórico para essa tecnologia, pois trata-se do primeiro STATCOM implementado no EUA e seu comissionamento ocorreu no fim do ano de 1995. A performance do equipamento superou todas as expectativas e se provou uma solução viável para os sistemas de transmissão de potência(SCHAUDER et al., 1997);
- **EUA (Sistema WAPA - *Western Area Power Administration*)**: Compensador TCSC foi instalado na subestação de Kayenta, estado do Arizona no ano de 1992. Permitiu controlar o fluxo de potência e tensões no sistema de transmissão, melhorando a estabilidade do sistema e aumentando a capacidade de transporte de energia da linha de 300 MW para 400 MW na linha existente de 230 kV que interliga Shiprock a Glen Canyon (JALALI et al., 1998);
- **EUA (Subestação Inez, *American Electric Power* - Kentucky)**: Foi a instalação do primeiro compensador UPFC no mundo, comissionado no ano de 1998. A construção teve como objetivo dar suporte na tensão e no controle de fluxo de potência ativa e reativa, solucionando problemas de sobrecargas durante o regime de contingência. Este UPFC possui potência de 160 MVA e atua em uma linha de transmissão de 345/138 kV que interliga uma fonte geradora na Subestação de Inez (TOKUNO, 2016);
- **Brasil (Interligação Norte-Sul)**: Dois compensadores TCSCs em operação na interligação dos sistemas elétricos Norte e Sul, ambos nas extremidade da linha. Mais de 1.000 quilômetros de linhas de transmissão em 500 kV ligando a subestação de Imperatriz, no Maranhão, à de Samambaia, no Distrito Federal, com capacidade de transmitir até 1.300 MW em ambos os sentidos. Quando entrou em operação, a Linha Norte-Sul diminuiu o risco de corte de fornecimento no Brasil devido à sua capacidade de transmitir potência entre dois extremos do País, permitindo com isto um remanejamento na geração de acordo com os índices de chuvas em cada região. Está operante desde 1999 (GAMA, 1999);
- **África do Sul (Sistema Kwazulu-Natal)**: Três compensadores SVCs foram instalados pela Siemens nos maiores centros de carga com objetivo de controlar a tensão do sistema. Foram instalados em duas subestações existentes de 245 kV,

Impalla e Illovo, e em uma subestação nova chamada Athene, de 400 kV. Os compensadores foram designados para estabilizar o sistema de forma dinâmica, reduzindo desbalanços de tensão e distúrbios na rede, aumentando a capacidade de transmissão e controlando a potência reativa do sistema. Estes compensadores estão operantes desde 1995 (OKEKE; ZAHER, 2013);

- **Indonésia (Subestação de Jember)**: Compensador SVC com capacidade de 75 MVar, instalado pela Siemens numa linha de transmissão é de 150 kV, que fornece rápido controle de tensão para permitir transferência de energia de forma aprimorada sob contingências extremas do sistema. Este projeto de compensador SVC foi baseado em conteinerização e permitiu a pré-fabricação, pré-instalação e pré-comissionamento do Sistema SVC na oficina do fabricante. Esta instalação e comissionamento em tempo reduzido do no local é um passo em frente para SVCs que podem ser facilmente transportáveis. Esse compensador está operante desde 1995 (OKEKE; ZAHER, 2013);

- **Austrália (Interconexão entres os sistemas Victoria e New South Wales)**: Utiliza compensadores SVC compostos de dois capacitores chaveados a tiristor e um reator chaveado a tiristor. Esse projeto envolveu tensões acima de 500 kV e distâncias acima de 2200 km, com potência de 500 MW. Os compensadores fornecem degraus uniformes em toda a faixa de funcionamento do sistema, e operam desde 1990 (HABUR; O'LEARY, 2004);

- **Coréia do Sul (KangJin, KEPCO - *Korean Electric Power Corporation*)**: Compensador UPFC com 80 MVA de potência foi instalado com o objetivo de solucionar problemas de equipamentos devido à elevação dos valores de corrente de curto-circuito, além de problemas de estabilidade do sistema em operação. Outro aspecto importante da construção desse compensador estava ligado à dificuldade da expansão do sistema de transmissão, em função das questões ambientais. Está operante desde 2003 (TOKUNO, 2016).

2.10 Dispositivos FACTS TCSC

O IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) define o compensador TCSC como: "Um compensador de reatância capacitiva que consiste em um banco de capacitores em paralelo com um reator controlado via tiristor, de modo a prover uma suave reatância capacitiva variável em série" (EDRIS, 1997).

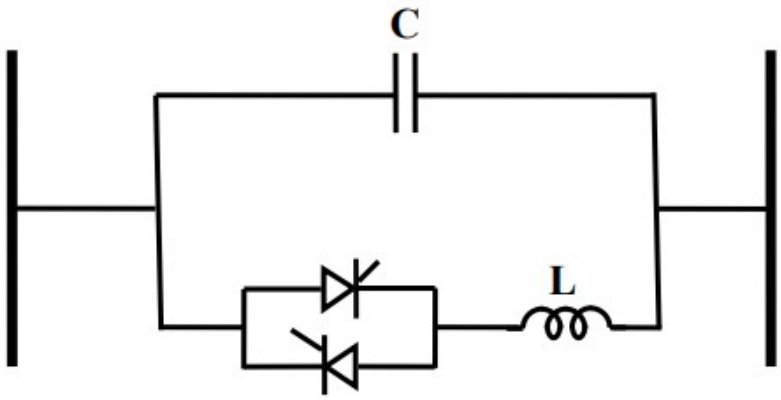
Embora o último "C" do termo TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) represente a palavra "Capacitor", dando a entender que esse compensador tenha ação capacitiva, o TCSC possui duas possíveis características: capacitiva e indutiva (GERBEX; CHERKAOUI; GERMOND, 2003).

Os tiristores permitem que uma mudança de impedância da linha seja feita de forma rápida, podendo manter o fluxo de potência ativa da linha no nível determinado para diferentes tipos de condições de operação, mostrando a importância desse controlador FACTS aprimorando as condições de operação e o desempenho do sistema elétrico (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

No entanto, harmônicos são produzidos pelo ramo TCR desse compensador, porém, sistemas práticos mostraram que as indutâncias das linhas e transformadores atuam como filtros, evitando que os harmônicos alcancem níveis significativos, fazendo com que estrutura seja bastante atraente como compensador série reativo controlado em altas potências devido à já consagrada tecnologia dos tiristores (POMILIO; DECKMANN, 2009).

A Figura 21 mostra a configuração de um módulo TCSC, consistindo de um banco de capacitores conectados em paralelo com um TCR (*Thyristor Controlled Reactor*), que é um reator controlado por tiristores bidirecionais. Em uma aplicação real, existem configurações com apenas um módulo TCSC ou com vários módulos TCSC conectados em série, com capacitores de tamanhos iguais ou diferentes, buscando uma melhor performance para o sistema elétrico (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Figura 21 – Representação do TCSC.



Fonte: (ALMADA, 2012).

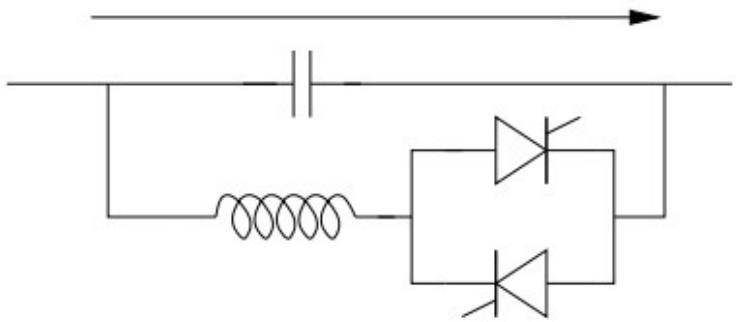
2.10.1 Modos de Operação do Compensador TCSC

A operação do TCSC depende da combinação entre as impedâncias paralelas dos reatores e capacitores que compõem o compensador. Normalmente, a compensação série no sistema de transmissão pode chegar a 30% da impedância total da linha. Este dispositivo controla o ângulo de transmissão através da mudança da impedância entre duas barras (MIASAKI, 2006). O compensador TCSC possui três modos de operação básicos: tiristor bloqueado, tiristor em *by-pass* e o modo Vernier. Cada modo é explicado nas subseções a seguir.

2.10.1.1 Tiristor Bloqueado

Nesse modo de operação a corrente não flui através dos tiristores, pois os pulsos estão bloqueados. Como alternativa, a corrente flui pelo capacitor e a reatância do TCSC se torna a mesma do que a do capacitor instalado, como mostrado na Figura 22. Geralmente esse modo não é utilizado (PADIYAR, 2007).

Figura 22 – Tiristor Bloqueado.

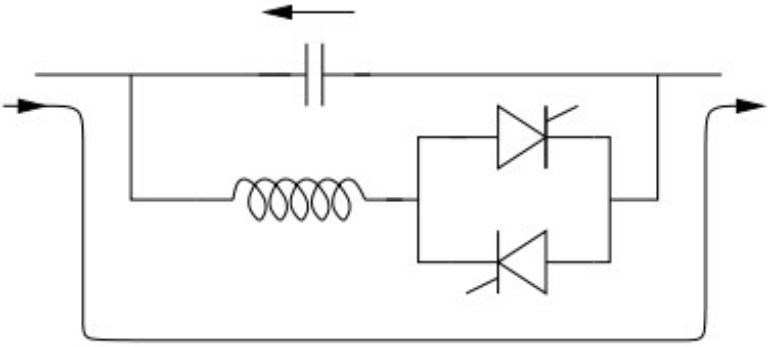


Fonte: (PADIYAR, 2007).

2.10.1.2 Tiristor em *By-Pass*

Nesse modo de operação, os tiristores estão conduzindo em tempo integral em ambas as direções, dessa forma a corrente circula com sua maior parte pelo reator, já que normalmente sua impedância é muito menor que a do capacitor, como mostrado na Figura 23. Esse módulo normalmente é utilizado para proteger os capacitores contra sobretensões durante os transitórios da linha de transmissão (PADIYAR, 2007).

Figura 23 – Tiristor em By-Pass.



Fonte: (PADIYAR, 2007).

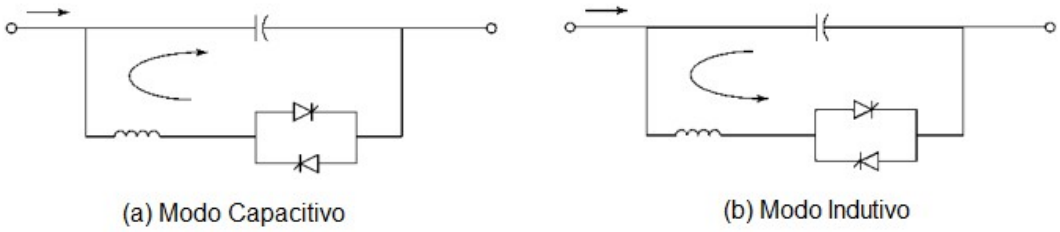
2.10.1.3 Modo Vernier

Nesse modo de operação, os tiristores estão operando de acordo com ângulos de disparo. Como pode ser visto na Figura 24, existem dois tipos de operação neste modo: (a) capacitivo e (b) indutivo. Quando o tiristor é operado com baixa condução, o ângulo de disparo está elevado e a reatância do TCSC se torna capacitiva pois a maior parte da corrente irá fluir pelo ramo do capacitor. De forma análoga, quando o tiristor está com alta condução, o ângulo de disparo está reduzido e a reatância do TCSC torna-se indutiva, pois dessa forma a maior parte da corrente flui pelo ramo do reator (HINGORANI; GYUGYI et al., 2000).

Como o TCSC é capaz de trabalhar como reatância capacitiva ou indutiva dependendo do ângulo de disparo dos tiristores, existe um problema de ressonância. Quando o ângulo de disparo possui um valor cujas reatâncias capacitiva e indutiva dos ramos do TCSC se tornam idênticas, o sistema entra em ressonância. Portanto, transições entre os modos capacitivo e indutivo não podem ser alternados de modo suave devido à região ressonante (Siqueira, 2012). Por isso, no modo de operação Vernier, não se deve operar com níveis de compensação elevados, pois existe o risco da reatância do dispositivo entrar em ressonância com a reatância da linha de transmissão. São recomendados níveis entre 20% a 70% da reatância da linha (ALMADA, 2012).

A Figura 25 mostra a tensão sobre o capacitor do compensador TCSC para diferentes valores de ângulos de disparo. É possível observar que a distorção da onda de tensão é maior quando o TCSC está operando na região indutiva. A polaridade da tensão também varia de acordo com a região em que o TCSC opera, já que o valor do ângulo de disparo define a direção da corrente no capacitor. As Figuras mostram que a amplitude da tensão aumenta quando o ângulo de disparo se torna mais próximo do ponto de ressonância.

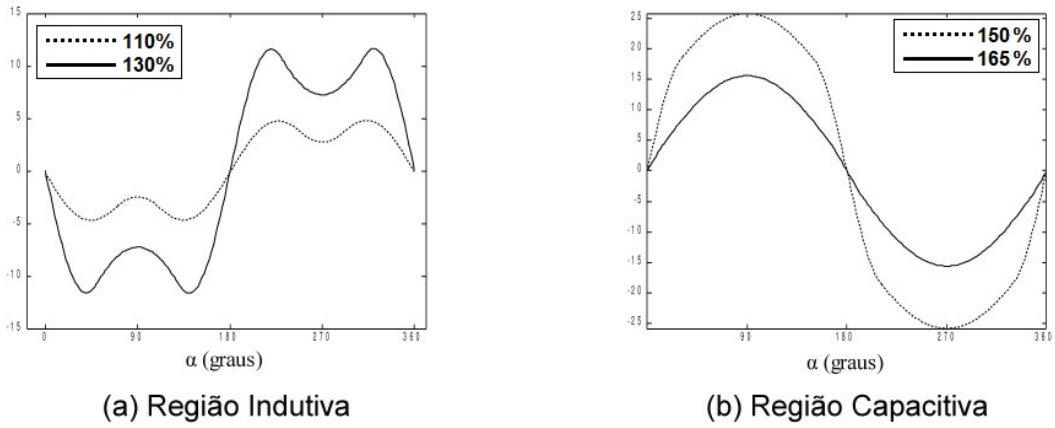
Figura 24 – Modo Vernier.



Fonte: (FERREIRA; SILVEIRA; LUIZ, 2020).

Como esperado, tanto no modo de tiristor bloqueado como no de tiristor em *by-pass*, a tensão sobre o capacitor é senoidal (TORTELLI, 2010).

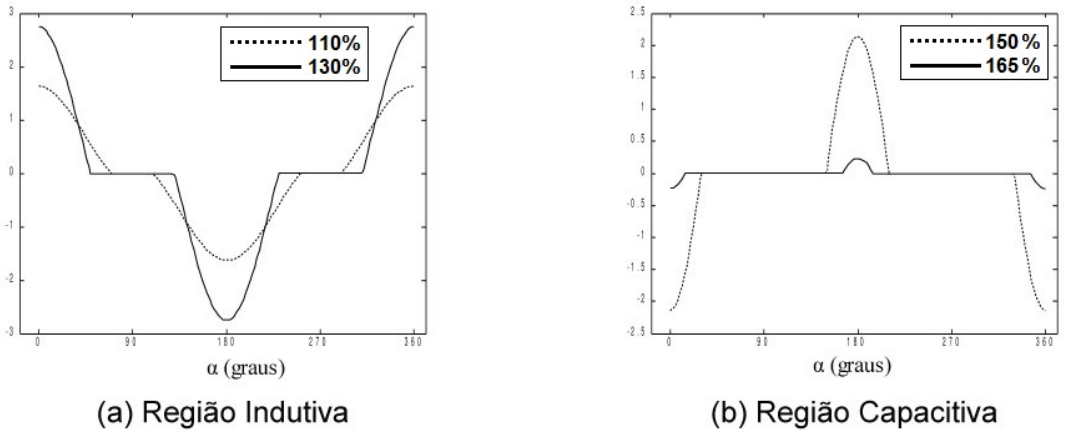
Figura 25 – Tensão sobre o capacitor no modo de operação Vernier.



Fonte: (TORTELLI, 2010).

As Figuras 26 e 27 mostram as correntes através dos ramos do TCR e do capacitor, respectivamente, para valores de ângulos de disparo diferentes. O valor do ângulo de disparo define a direção da corrente através dos ramos do TCR e do capacitor, que são sempre opostas. É possível perceber que a amplitude da corrente aumenta próximo do ponto de ressonância. Quando o compensador TCSC opera na região indutiva, a corrente através do tiristor é maior que a através do capacitor. O inverso também acontece quando o TCSC opera na região capacitiva (TORTELLI, 2010).

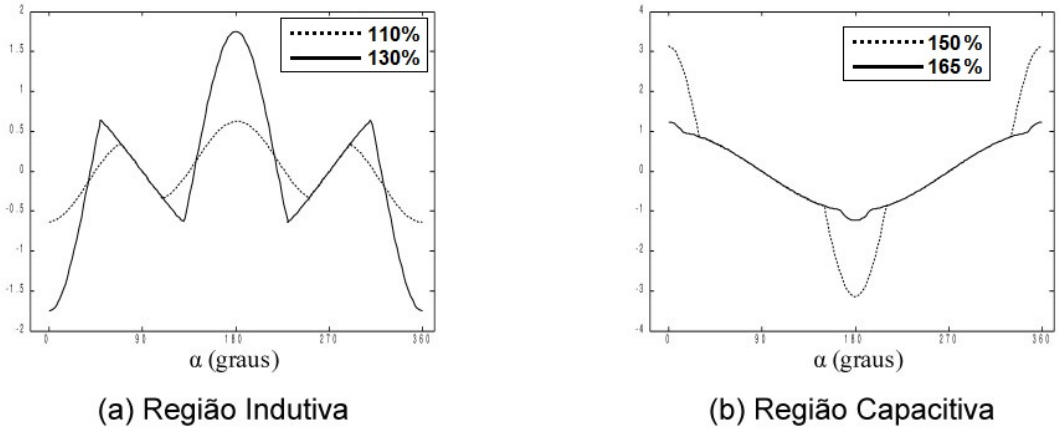
Figura 26 – Corrente no tiristor do TCSC no modo de operação Vernier.



(a) Região Indutiva (b) Região Capacitiva

Fonte: (TORTELLI, 2010).

Figura 27 – Corrente no capacitor do TCSC no modo de operação Vernier.



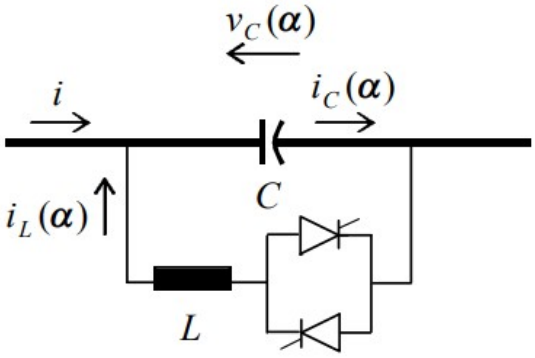
(a) Região Indutiva (b) Região Capacitiva

Fonte: (TORTELLI, 2010).

2.10.1.4 Fluxo de potência em linha de transmissão com um TCSC

O compensador TCSC é modelado em regime permanente como uma reatância entre duas barras capaz de variar entre valores especificados, mantendo o fluxo de potência ativa segundo uma referência. Na Figura 28, é mostrado um TCSC associado à uma linha de transmissão (MACHADO et al., 2003).

Figura 28 – Representação de um TCSC.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

O objetivo básico de um TCSC é de fornecer uma capacitância variável de forma contínua através do ângulo de disparo dos tiristores. Pode-se dizer então que a impedância do TCSC é resultante do paralelo entre as impedâncias do TCR e do capacitor que é demonstrado na equação 2.1

$$\frac{1}{X_{TCSC}} = \frac{1}{X_L(\alpha)} + \frac{1}{X_C} \tag{2.1}$$

A equação 2.1 pode ser ajustada transformando na equação 4.3

$$X_{TCSC} = \frac{X_L(\alpha)X_C}{X_L(\alpha) + X_C} \tag{2.2}$$

A amplitude I da corrente fundamental no reator pode ser expressa em função do ângulo de disparo α conforme equação 2.3.

$$I(\alpha) = \frac{V}{\omega L}(\frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}) \tag{2.3}$$

Assim, juntando as equações 4.3 e 2.3, temos a equação 2.4.

$$X_L(\alpha) = \frac{1}{B(\alpha)} = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}, X_L \leq X_L(\alpha) < \infty \tag{2.4}$$

Considerando que:

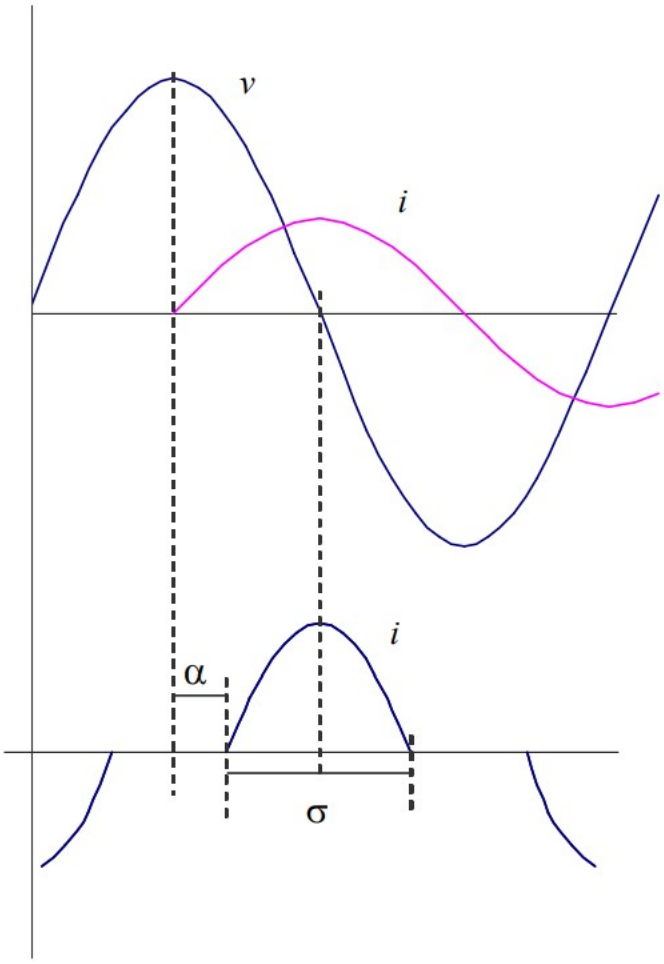
$$X_L = \omega L$$

$$X_L(\alpha) = X_L \quad \text{para} \quad \alpha = 0$$

$$X_L(\alpha) \to \infty \quad \text{para} \quad \alpha \approx \frac{\pi}{2{,}8}$$

O ângulo α é o ângulo de atraso medido a partir do pico de tensão no capacitor, conforme a Figura 29.

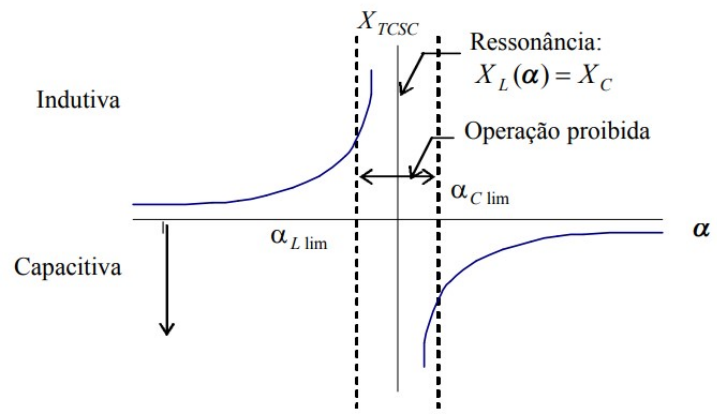
Figura 29 – Ângulo de disparo e ângulo de condução.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

A Figura 30 apresenta o comportamento da reatância X_{TCSC} em função do ângulo α. Como pode ser visto, o TCSC representa um circuito LC ajustável com duas regiões de operação: Indutiva e Capacitiva (MACHADO et al., 2003).

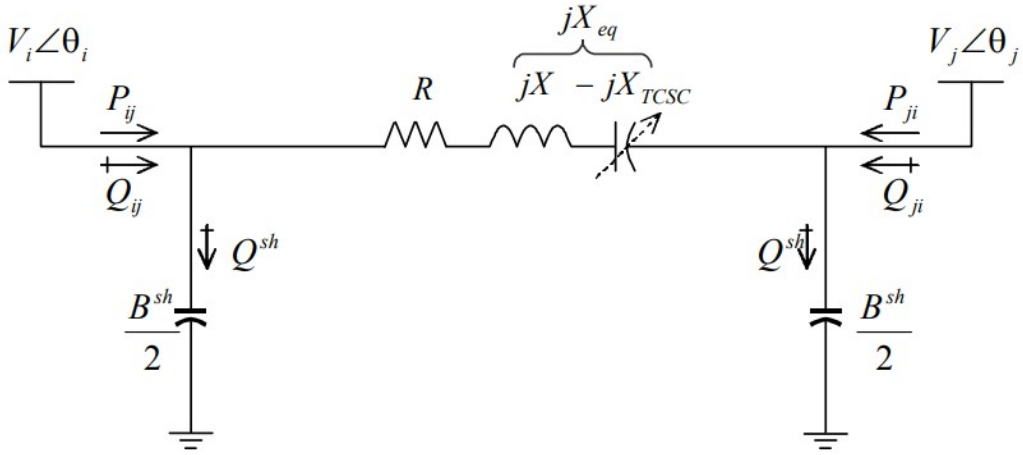
Figura 30 – Característica da impedância Xtcsc pelo ângulo alfa.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

À medida que $X_L(\alpha)$ varia entre $X_L \rightarrow \infty$ e $X_L(\alpha) = \omega$L, o TCSC aumenta sua impedância capacitiva mínima, $X_{TCSC_{min}} = X_C = \frac{1}{\omega C}$ e portanto o grau de compensação capacitiva em série até a ressonância paralela com $X_C = X_L$. Diminuindo ainda mais $X_L(\alpha)$, a impedância do TCSC torna-se indutiva, chegando ao valor mínimo quando $\alpha = 0$. Dessa forma , o capacitor é curto-circuitado pelo ramo TCR. Portanto as faixas de operação do TCSC podem ser definidas como: capacitiva com $\alpha_{Clim} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ e outra indutiva com $0 \leq \alpha \leq \alpha_{Clim}$ (MACHADO et al., 2003). Na Figura 31, um TCSC associado à uma linha de transmissão é representado no modelo π.

Figura 31 – Modelo pi de uma linha de transmissão com um TCSC.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

O fluxo de potência da linha é determinado pelos módulos e ângulos de fase das tensões terminais além dos parâmetros da linha de transmissão. Pela Figura 31 é obtido a equação 2.5.

$$X_{eq} = X - X_{TCSC} = (1 - K)X \tag{2.5}$$

Obtendo assim a equação 2.6 do grau de compensação K e a equação 2.7 da potencia ativa e a equação 2.8 da potência ativa em relação a K.

$$K = \frac{X_{TCSC}}{X}, 0 \leq K < 1 \tag{2.6}$$

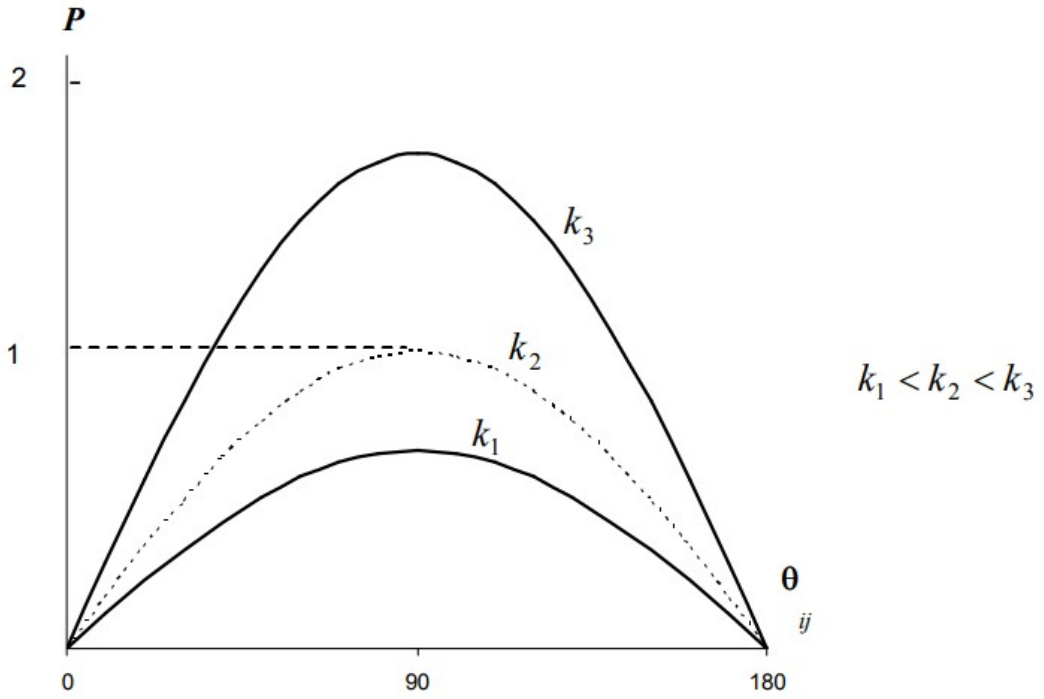
$$P_{ij} = \frac{1}{R^2 + X_{eq}^2}[RV_i^2 - RV_iV_j\cos\theta_{ij} + X_{eq}V_iV_j\sin\theta_{ij}] \tag{2.7}$$

Considerando $R \approx 0$, e um perfil de tensões plano onde $V_i = V_j = V$, resulta:

$$P_{ij} = \frac{1}{1-K}\frac{V^2}{X}\sin\theta_{ij} \tag{2.8}$$

Então é possível concluir que o grau de compensação série k é diretamente relacionado ao valor de potência ativa P_{ij}, assim, o aumento de k causa um aumento de potência ativa e de modo análogo, a redução de k reduz também a potência ativa, como pode ser visto na Figura 32 (MACHADO et al., 2003).

Figura 32 – Fluxo de potência ativa X ângulo teta.



Fonte: (MACHADO et al., 2003).

2.10.1.5 Características do TCSC

O tópico anterior mostrou que os TCSCs possuem a propriedade controlar o fluxo em linhas de transmissão. Porém esse compensador também possui outras propriedades, como:

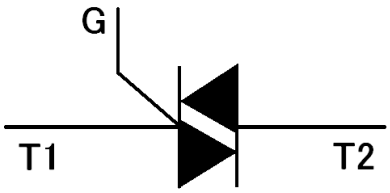
- Reduzir a impedância série, de modo a reduzir também a variação de tensão terminal, reduzindo assim a probabilidade de colapso de tensão;
- Aumentar a estabilidade transitória por meio do aumento da capacidade de transmissão de potência;
- Amortecer oscilações de potência pela variação da compensação série, de forma a neutralizar as oscilações causadas por acelerações e desacelerações de distúrbios de máquinas;
- Amortecer oscilações subtransitórias;
- Controlar o fluxo de potência por caminhos paralelos na rede de transmissão.

2.11 Triodo de corrente alternada (TRIAC)

Os TRIACs são componentes eletrônicos e fazem parte da família dos tiristores. Eles são componentes de estado sólido de alta velocidade equivalente a dois SCRs ligados em antiparalelo e com o terminal de disparo ligados juntos. Essa ligação resulta em uma chave eletrônica bidirecional que pode conduzir a corrente elétrica nos dois sentidos (NASCIMENTO et al.,).

O TRIAC funciona como um interruptor controlado e apresenta características funcionais de um SRC (*Sillicon Controlled Rectifier* ou Retificador Controlado de Silício). Porém, ele possui uma vantagem de conduzir em ambos os sentidos de polarização. A simbologia do TRIAC pode ser vista na Figura 33 a seguir (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

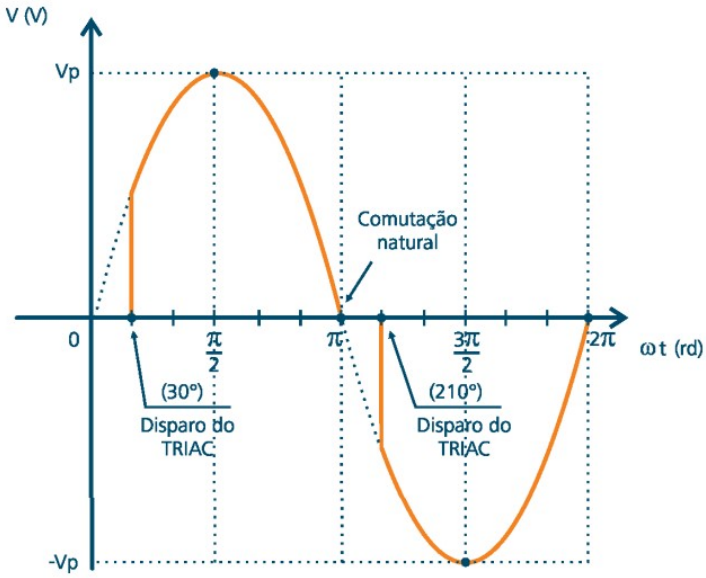
Figura 33 – Simbologia do TRIAC.



Fonte: (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

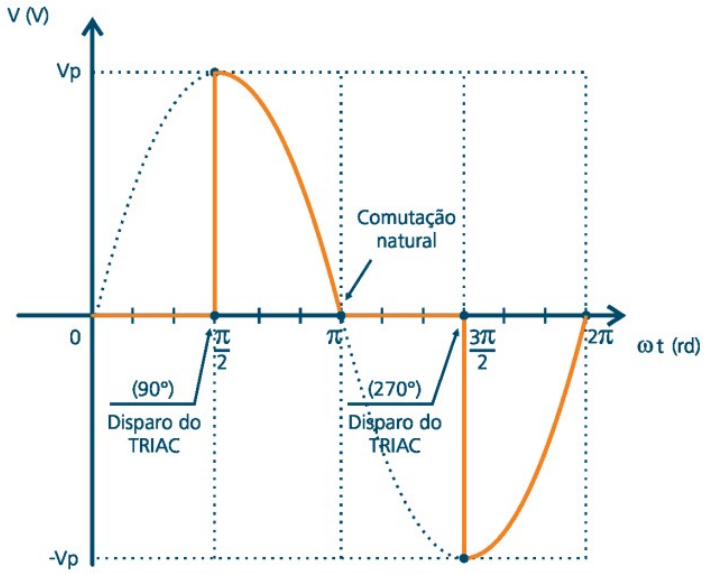
O ângulo de disparo do TRIAC define o momento do ciclo positivo e negativo no qual a corrente irá passar por ele. Isso significa que a função de chave controlada torna o TRIAC um dispositivo amplamente utilizável pela eletrônica de potência, assim como nos dispositivos FACTS como o TCSC. Nas Figuras 34 e 35 abaixo, temos as curvas de carga de um circuito simples chaveado com os ângulos de 30° e 90°, respectivamente (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

Figura 34 – Forma de onda de tensão sobre a carga com disparo em 30 graus.



Fonte: (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

Figura 35 – Forma de onda de tensão sobre a carga com disparo em 90 graus.



Fonte: (SEGUNDO; RODRIGUES, 2015).

É possível observar nas Figuras 34 e 35, que os ângulos de disparo definem a curva de tensão da carga. Com um bom controle do disparo, o TRIAC torna-se uma ferramenta poderosa na elaboração de circuitos de potência, tornando possível a construção do dispositivo FACTS TCSC.

2.12 Resumo da seção

Nesta seção foram apresentadas informações sobre linhas de transmissões e problemas que possam ocorrer na linha, afim de contextualizar alguns dos problemas encontrados na vida real e assim mostrar a necessidade do desenvolvimento de soluções para estes problemas. Nesta sequência as FACTS são apresentadas como uma das possíveis soluções para linhas de transmissões, mostrando suas classificações em diferentes análises, demonstrando como são escolhidas para diferentes casos.

Os estudos das FACTS e dos sistemas de transmissão permitem prosseguir com a elaboração do projeto da FACTS TCSC, assunto descrito na próxima seção.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Introdução

O interesse em desenvolver este trabalho veio através da percepção do crescimento dos sistemas elétricos de potência que são necessários, pois a demanda de energia elétrica é cada vez maior. Com isso vem a necessidade de sistemas de transmissão mais seguros e com capacidade de entregar essa energia com mais qualidade aliado à redução de gastos e sem esquecer dos fatores ambientais que devido à legislação são cada vez mais severos.

A capacidade de otimizar sistemas de transmissão existentes em diversos quesitos diferentes foi um grande atrativo para que a pesquisa fosse focada no modelo de compensador TCSC, que já possui resultados satisfatórios espalhados pelo mundo, inclusive no Brasil. Seu método de construção simples em conjunto com os benefícios que ele traz faz com que seja um atrativo tanto para os projetistas de novas linhas quanto para os engenheiros responsáveis por reformas de linhas existentes.

Neste capítulo, uma representação de uma linha de transmissão foi dividido em 3 partes de forma a possibilitar o pensamento particionado de cada parte do projeto e, assim, facilitar as contas. A separação do circuito tal qual as contas realizadas são apresentados nas subseções seguintes finalizando com as simulações dos projetos calculados.

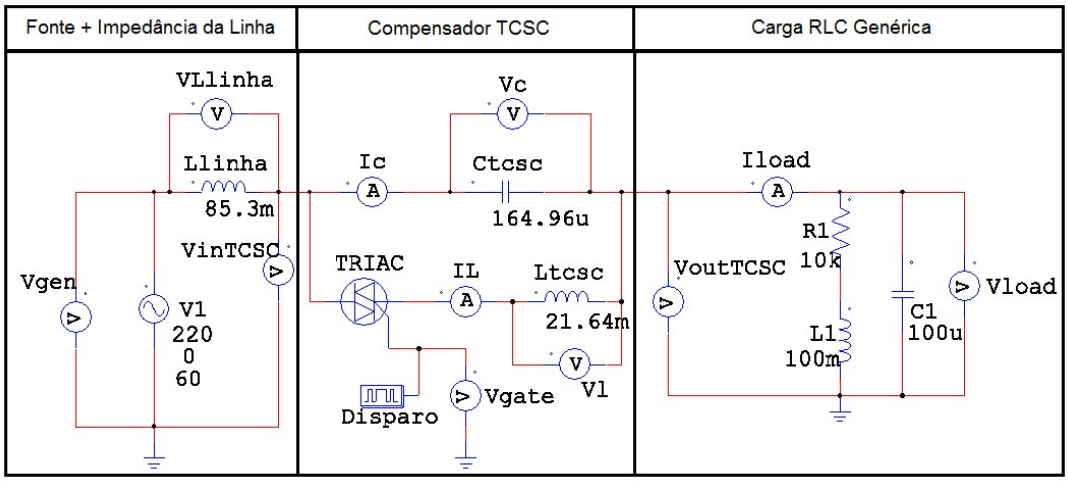
Além disso, nesta seção, um dispositivo compensador FACTS de modelo TCSC foi projetado através de cálculos mostrados na teoria e, em seguida, foi simulado via *software* e testado com ângulos de disparo diferentes, em característica de carga diferentes. E todo esse processo foi explicado com embasamento técnico e com uma análise crítica de forma a mostrar de forma prática o conteúdo mostrado até então neste documento.

3.2 Divisão do circuito do TCSC

O circuito do TCSC imerso em um sistema de transmissão pode ser dividido em partes, facilitando assim a análise de cada um individualmente. A primeira parte é composta por uma fonte de tensão e por uma impedância característica de linha de transmissão. A segunda parte possui os elementos do compensador TCSC, incluindo a chave tiristorizada TRIAC, o indutor e o capacitor. Por último, tem-se uma carga RLC genérica para representar o

consumo da potência do sistema. Na Figura 36, é possível observar cada uma dessas partes conectadas.

Figura 36 – Divisão do circuito do TCSC.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 Bloco de geração e linha de transmissão

O bloco de geração é composto por uma fonte de tensão senoidal de 60 Hz com módulo de 220 V e ângulo 0°. A parte da linha de transmissão foi considerada em uma linha de transmissão de 80 km de comprimento e com impedância de 0,402 ω/km, que são exemplos de valores reais encontrados na literatura. Portanto, podemos calcular os valores de X_l ao longo da linha através das equações 3.1 e 3.2 mostradas a seguir.

$$X_{LLinha} = l * X_{L/Km} = 80 * 0,402 = 32,16ohms \tag{3.1}$$

$$L_{Linha} = \frac{X_{LLinha}}{\omega} = 85,3mH \tag{3.2}$$

3.4 Bloco do compensador TCSC

O bloco compensador é composto pelo paralelo entre o ramo TCR e o capacitor. E como foi mostrado na teoria do dispositivo TCSC, os níveis de compensação de reativos estão entre 20% e 70% . Desta forma, para que o teste se dê entre os valores intermediários, foi escolhido então o valor de 50% (valor do fator K). Esse valor é uma característica

de quando o TCSC está em modo de operação bloqueado, e isso significa que o valor de compensação está máximo. O calculo de X_{ctcsc} é apresentado na equação 3.3 a seguir.

$$X_{CTCSC} = 50\% * X_{LLinha} = 16,08\Omega \tag{3.3}$$

Usando os valores da equação 3.3, podemos calcular o valor de C_{tcsc} como mostrado na equação 3.4 a seguir.

$$X_{CTCSC} = \frac{1}{\omega C_{TCSC}} = 16,08 \rightarrow C_{TCSC} = 164,96\mu F \tag{3.4}$$

Para definir o valor do indutor do ramo TCR, é necessário antes definir o valor do ângulo de disparo α, que deve ser maior que o pico de tensão senoidal dado em 90°. Valores do ângulo de disparo próximos a 90° não são adequados pois o chaveamento não faz com que as correntes tenham transição no nível de tensão de 0V, ocasionando assim problemas para o circuito. Portanto, foi escolhido um ângulo $\alpha = 30° = \frac{\pi}{6}$ rad como valor de ângulo onde a ressonância aconteça. A equação 3.5 mostra o calculo de X_{LTCSC} e de L_{TCSC}, considerando que $X_{LTCSC}(\alpha) = X_{CTCSC}$ para $\alpha = \frac{\pi}{6}$.

$$X_{LTCSC}(\frac{\pi}{6}) = (\omega L_{TCSC} * (\frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin\alpha}) = 16,08\Omega \rightarrow L_{TCSC} = 21,64mH \tag{3.5}$$

Desta forma, os valores de indutor e capacitor do TCSC estão definidos de forma precisa. E os valores de L_{TCSC} e C_{TCSC} proporcionam a ressonância para $\alpha = 30° = \frac{\pi}{6}$ rad.

3.5 Desenvolvimento do dispositivo TCSC em *software*

O dispositivo compensador TCSC foi esclarecido nas últimas sessões e a comprovação de sua capacidade despertou a necessidade de testes. Para que esses testes fossem possíveis, houve a necessidade de realizar simulações via um *software* consistente que pudesse permitir análises fidedignas através da geração de gráficos e da análise das curvas características do sistema. O simulador utilizado foi o PSIM.

3.5.1 *Software* simulador de circuitos elétricos PSIM

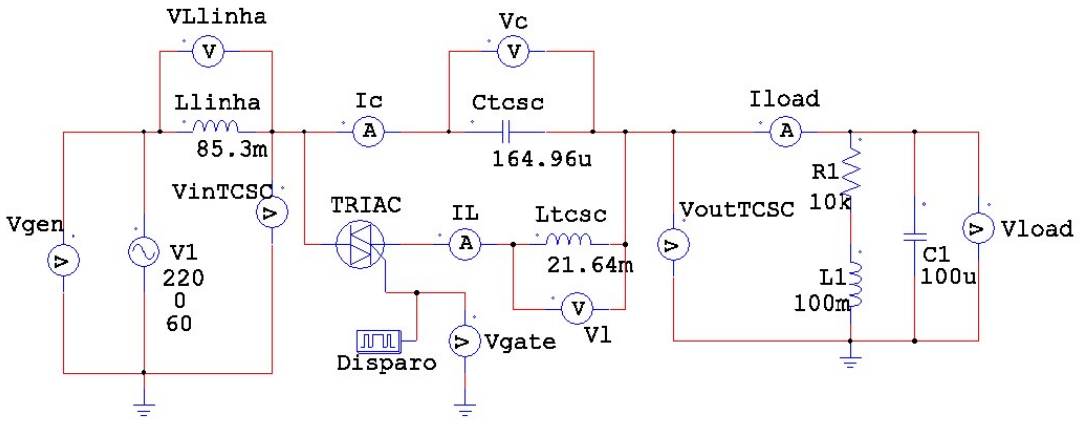
O PSIM é um software simulador de circuitos elétricos e eletrônicos, que foi desenvolvido pela empresa *Powersim* e apresentado no ano de 1994. Construído inicialmente para o uso específico na construção e simulação de circuitos de eletrônica de potência e controle de motores, hoje ele é capaz de simular praticamente toda a gama de circuitos elétricos existentes, sendo um concorrente direto do *Simulink*, da *Mathworks*.

Diversos módulos melhoram sua capacidade de simular e desenvolver circuitos em diversas áreas como: teoria de controle, motores elétricos, circuitos fotovoltaicos, turbinas eólicas e entre outros. O PSIM é amplamente usado pela indústria para pesquisa e desenvolvimento de produtos além de ser usado por instituições de ensino para pesquisa e ensino, sendo adquirido pela *Altair Engineering* em março de 2022.

3.5.2 Circuito do TCSC

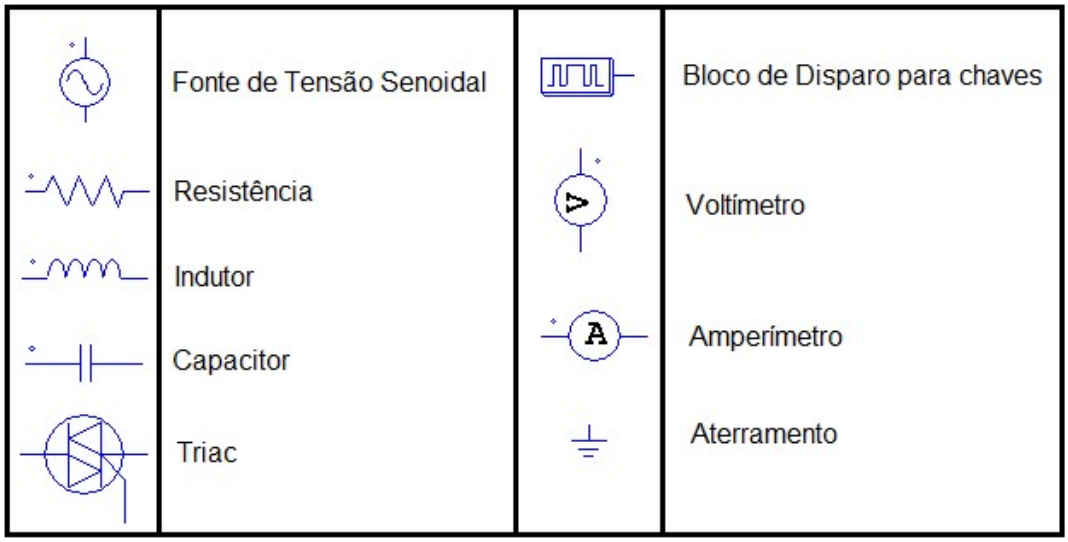
O desenvolvimento do circuito do TCSC pode ser visto na Figura 37 com sua legenda na figura 38. Como é possível observar, o circuito é alimentado por uma fonte de tensão senoidal de módulo 220 V, ângulo 0 ° e frequência 60 Hz que representa o elemento gerador da linha de transmissão em suas devidas proporções. O indutor L_{linha} representa a impedância indutiva da linha e possui o módulo de 85,3 mH. Respectivamente, R_1, L_1 e C_1 representam o resistor de 10 kΩ , o indutor de 100 mH e capacitor de 100 μF, respectivamente, que formam a carga do circuito, e em conjunto eles representam uma impedância proveniente do circuito RLC.

Figura 37 – Circuito do TCSC representado no PSIM.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 – Legenda dos blocos do PSIM.



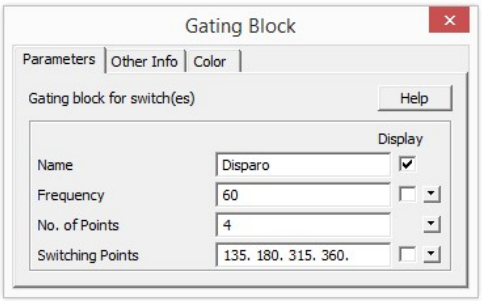
Fonte: Produção do próprio autor.

O compensador TCSC é composto pelo capacitor C_{TCSC} de 164,96 μF em paralelo com ramo do TCR, que é representado pela conexão série entre o Triac, que é a chave tiristorizada controlada via ângulo de disparo, e o indutor L_{TCSC} de 21,64 mH. O bloco de disparo é um artifício que o PSIM possui que é capaz de gerar os picos de disparo para o Triac através de ondas quadradas controladas. E por fim, o circuito é recheado de voltímetros e amperímetros que serão responsáveis pela leitura das grandezas elétricas que serão utilizadas na geração dos gráficos para a análise do circuito.

3.5.3 Bloco disparador para chaves do PSIM

O bloco disparador de chaves do PSIM é um bloco com o objetivo de definir o padrão de chaveamento do bloco chaveado. O número de oscilações é definido pelo total de trocas de estado dentro de um período de tempo, onde cada nível lógico alto e baixo são contados como uma troca de estado. Nesse bloco é necessário definir a frequência, o número de pontos, o valor em graus de cada ponto e o nome do bloco, conforme é possível observar na figura 39 (MANUAL PSIM,).

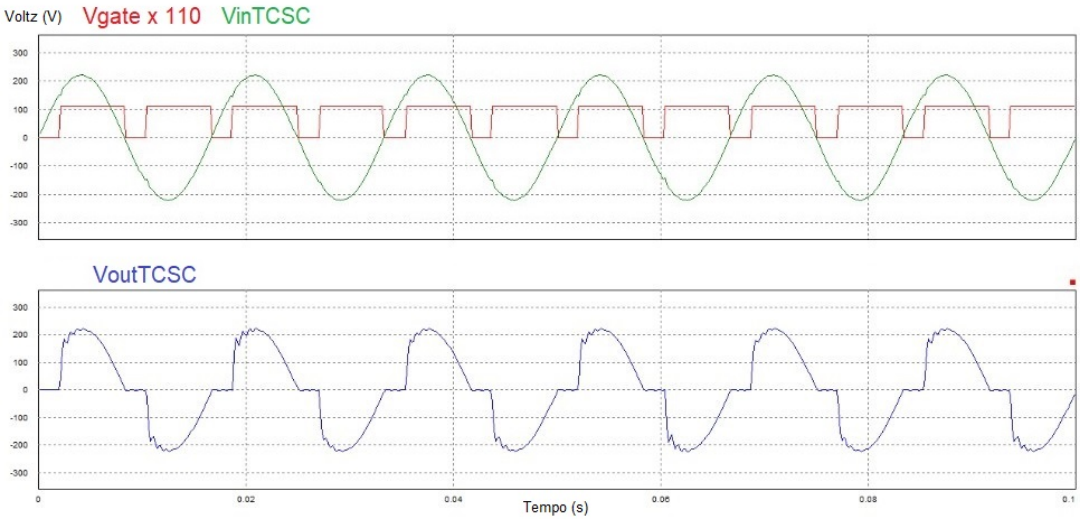
Figura 39 – Bloco de disparo.



Fonte: Produção do próprio autor.

No caso do Triac, é necessário configurar os disparos levando em consideração a condução de ambos os tiristores, sendo então necessários quatro pontos de troca. Para o caso da figura 39 acima, o ângulo de disparo é de 45° para ambos os sentidos de condução, perdurando até o fim dos ciclos positivo e negativo. Na figura 40 pode ser compreendido como esses disparos são realizados (MANUAL PSIM,).

Figura 40 – Ondas antes e depois da chave tiristorizada.



Fonte: Produção do próprio autor.

Na figura 40, é possível observar que a tensão de saída do TCSC está sendo controlada pelo chaveamento do Triac, por meio de cada ângulo definido no bloco disparador, conforme o esperado.

3.6 Resumo da seção

Esta seção apresentou os cálculos feitos para a projeção de uma FACTS TCSC através de cálculos de indutor, capacitor e ângulos de disparo. Importante ressaltar como informação importante desta seção é a demonstração que, para um projeto, a escolha das condições de contorno, tal como o ângulo α, são extremamente importantes.

O entendimento dos cálculos feitos nesta seção são cruciais para a seção seguinte onde são apresentados estes cálculos com valores reais e as simulações, além de comparações com as respostas teóricas.

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através dos testes realizados o PSIM com circuitos de controladores FACTS TCSC simulando uma rede real com impedância de linha, fonte e carga.

Nas subseções a seguir são apresentados imagens dos circuitos e das formas de onda geradas como resposta, afim de conectar as ideias da teoria escrita com as respostas nas simulações.

São apresentados tanto o circuito com valores teóricos, valores que seriam os ideias para um funcionamento perfeito em um sistema hipotético, quanto o circuito com valores reais dos componentes, afim de observar as alterações que um caso real causa a resposta de um sistema (mesmo que hipotético) de linha de transmissão.

4.2 Testes do circuito TCSC

Como foi apresentado até aqui, o compensador TCSC pode ser controlado pelo ângulo de disparo de seus tiristores e isso define se o modo de condução Vernier está capacitivo ou indutivo. Conforme mostrado anteriormente, o ângulo de disparo $\alpha = 30°$ representa a ressonância, onde $X_{LTCSC}(\alpha) = X_{CTCSC}$.

Portanto para fim de testes foram escolhidos ângulos de disparo dos tiristores de 110°, indicando o modo de condução indutivo, o ângulo de 135° indicando o modo de condução capacitivo. Para cada um desses ângulos, será mostrada uma análise crítica do circuito com uma carga fixa pré definida.

Como os valores do capacitor C_{TCSC} e do indutor L_{TCSC} calculados não são valores comerciais, um teste do circuito do TCSC trocando esses componentes por componentes de valores comerciais se torna válido, trazendo a simulação para mais próximo de um circuito real.

4.2.1 Testes do circuito do TCSC com disparo em 110°

Para um ângulo de disparo de 110°, o modo de condução se torna levemente indutivo, e temos $\alpha = 20° = \frac{\pi}{9}$ rads. As equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 a seguir mostram os cálculos de X_L e X_C, X_{TCSC}, X_{eq} e o valor de K.

$$X_L(\frac{\pi}{9}) = (2\pi * 60 * 21,64 * 10^{-3}) * (\frac{\pi}{\pi - 2\frac{\pi}{9} - \sin\frac{\pi}{9}}) \rightarrow X_L(\frac{\pi}{9}) = 12,196\Omega \quad (4.1)$$

$$X_C = 16,08\Omega \quad (4.2)$$

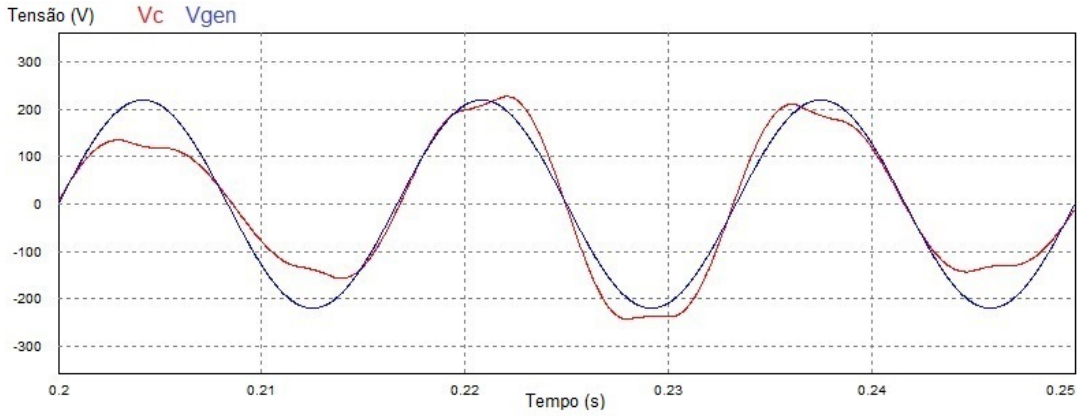
$$X_{TCSC} = \frac{X_C * X_L}{X_C + X_L} \rightarrow X_{TCSC} \approx 6,935\Omega \quad (4.3)$$

$$X_{eq} = \omega L_{Linha} - X_{TCSC} = 19,964\Omega \quad (4.4)$$

$$K = \frac{X_{TCSC}}{X_{Linha}} = 0,215 \quad (4.5)$$

Para o circuito com o ângulo $\alpha = 20$ °, é sabido que o modo de condução está ligeiramente indutivo e portanto podemos comprovar os gráficos mostrados nos capítulos anteriores. Conforme pode se ver abaixo na figura 41, a tensão V_C no capacitor do TCSC se comporta conforme mostrado anteriormente na figura 25(a).

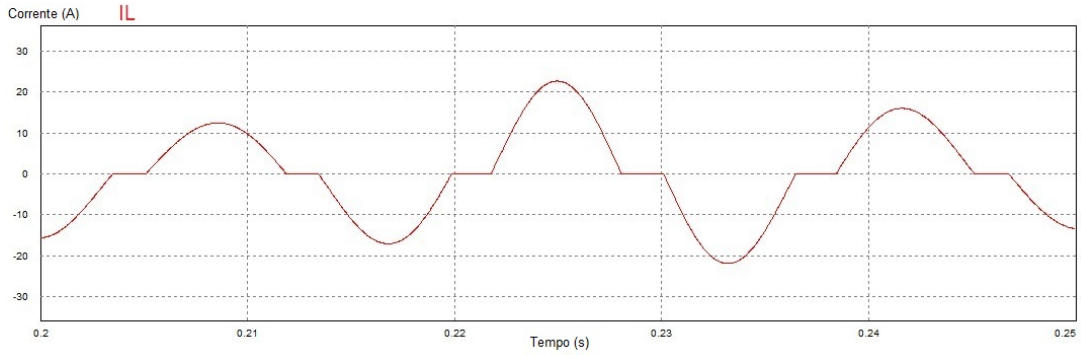
Figura 41 – Tensão Vc sobre o Capacitor do TCSC no modo de condução Vernier Indutivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

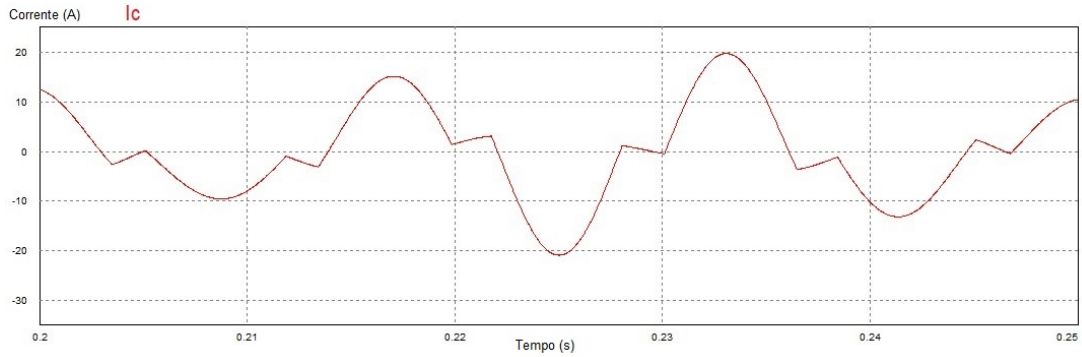
Também pode-se observar nas figuras 42 e 43 que as correntes do indutor I_{LTCSC} e I_{CTCSC} possuem o mesmo padrão encontrado anteriormente nas figuras 26(a) e 27(a).

Figura 42 – Corrente no IL no Tiristor no modo de condução Vernier Indutivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 43 – Corrente Ic no Capacitor no modo de condução Vernier Indutivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Outra característica das curvas das figuras 41, 42 e 43 é que os eixos x dos gráficos começam para o tempo de 0,2 segundos e terminam para o tempo de 0,25 segundos. Isso se dá pois existe um transitório para tempos abaixo de 0,1 segundos, portanto as comparações com os gráficos das figuras 25(a), 26(a) e 27(a) são realizadas em regime permanente.

4.2.2 Testes do circuito do TCSC com disparo em 135°

Para um ângulo de disparo de 135°, o modo de condução se torna capacitivo, e temos $\alpha = 45° = \frac{\pi}{4}$ rads. As equações 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 a seguir mostram os cálculos de X_L, X_C, X_{TCSC}, X_{eq} e o valor de K, respectivamente.

$$X_L(\frac{\pi}{4}) = (2\pi * 60 * 21,64 * 10^{-3}) * (\frac{\pi}{\pi - 2\frac{\pi}{4} - \sin\frac{\pi}{4}}) \rightarrow X_L(\frac{\pi}{4}) = 26,97\Omega \quad (4.6)$$

$$X_C = 16,08\Omega \quad (4.7)$$

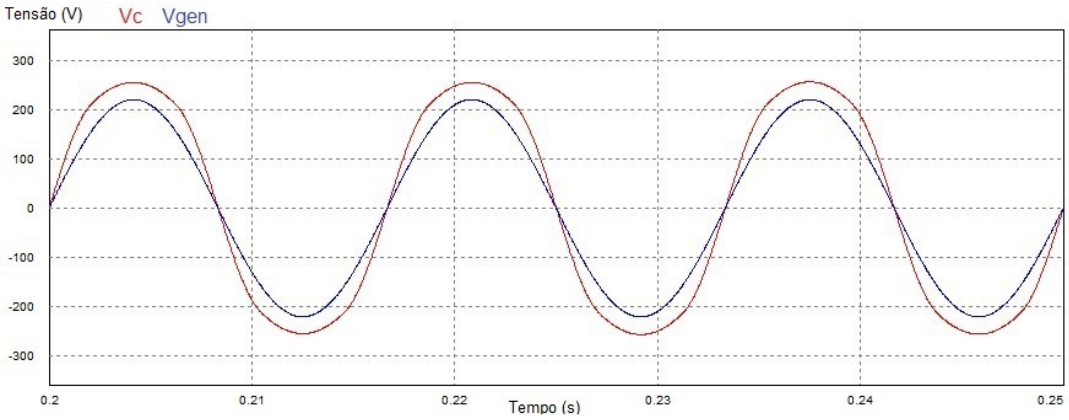
$$X_{TCSC} = \frac{X_C * X_L}{X_C + X_L} \rightarrow X_{TCSC} \approx 10,428\Omega \quad (4.8)$$

$$X_{eq} = \omega L_{Linha} - X_{TCSC} = 21,732\Omega \quad (4.9)$$

$$K = \frac{X_{TCSC}}{X_{Linha}} = 0,324 \quad (4.10)$$

Para o circuito com o ângulo $\alpha = 45°$, sabemos que o modo de condução está ligeiramente indutivo e portanto podemos comprovar os gráficos mostrados nos capítulos anteriores. Conforme pode se ver abaixo na figura 44, a tensão V_C no capacitor do TCSC se comporta conforme mostrado anteriormente na figura 25(b).

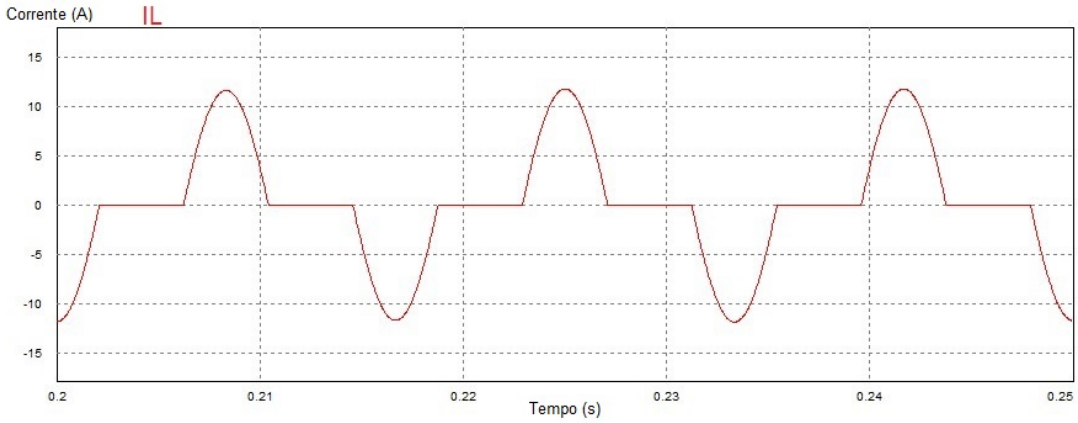
Figura 44 – Tensão Vc sobre o Capacitor do TCSC no modo de condução Vernier Capacitivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

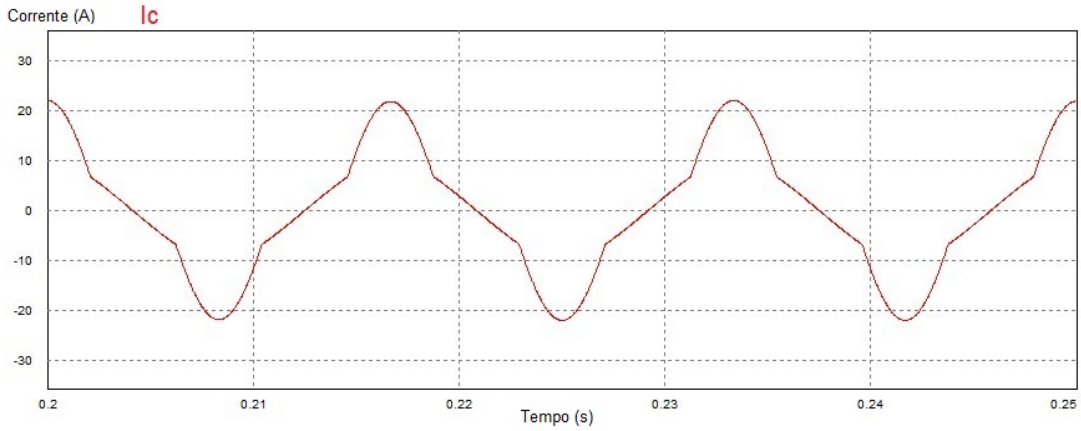
Também pode-se observar nas figuras 45 e 46 que as correntes do indutor I_{LTCSC} e I_{CTCSC} possuem o mesmo padrão encontrado anteriormente nas figuras 26(b) e 27(b).

Figura 45 – Corrente IL no Tiristor no modo de condução Vernier Capacitivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 – Corrente Ic no Capacitor no modo de condução Vernier Capacitivo.



Fonte: Produção do próprio autor.

Outra característica das curvas das figuras 44, 45 e 46 é que os eixos x dos gráficos começam para o tempo de 0,2 segundos e terminam para o tempo de 0,25 segundos. Isso se dá pois existe um transitório para tempos abaixo de 0,1 segundos, portanto as comparações com os gráficos das figuras 25(b), 26(b) e 27(b) são realizadas em regime permanente.

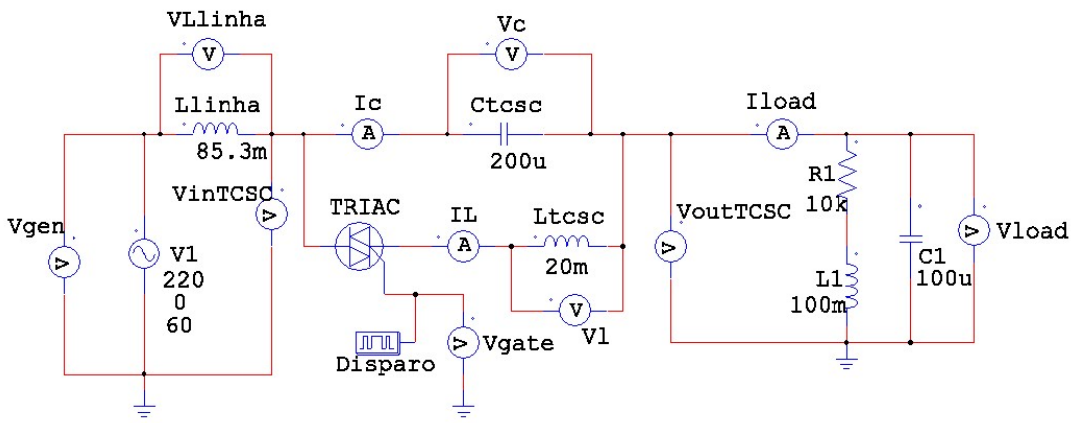
4.2.3 Teste do circuito do TCSC com valores comerciais de indutor e capacitor

O circuito do TCSC testado nos tópicos anteriores possui componentes como o capacitor e o indutor do TCSC calculados através das técnicas de dimensionamento. Porém existe a dificuldade de encontrar no mercado estes componentes com os valores calculados. Desta forma, faz-se necessário o teste do circuito com a utilização de valores de C_{TCSC} e L_{TCSC} comerciais, trazendo para mais próximo da realidade a montagem do circuito testado

anteriormente.

Baseado nos valores comerciais, foi escolhido um C_{TCSC} de 200 μF e um L_{TCSC} de 20 mH. Valores estes aproximados dos C_{TCSC} e L_{TCSC} calculados para os testes dos últimos tópicos. Com essas alterações, o circuito do TCSC no *software* do PSIM fica conforme a figura 47 a seguir.

Figura 47 – Circuito do TCSC utilizando valores comerciais.



Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando o novo valor de capacitor, podemos calcular o valor de X_{CTCSC} como mostrado na equação 4.11 a seguir.

$$X_{CTCSC} = \frac{1}{\omega * C_{TCSC}} = 13,263\Omega \tag{4.11}$$

Isso significa que, para o novo valor de X_{CTCSC}, a compensação máxima desse circuito, que ocorre quando o valor de $X_{CTCSC} = X_{TCSC}$, e pode ser calculada através da equação 4.12 mostrada a seguir.

$$K_{Max} = \frac{X_{TCSC}}{X_{Linha}} = 0,412 \tag{4.12}$$

Portanto essa alteração de componentes reduz a compensação anterior de 50% para 41,2% . Outra característica que pode ser observada é o novo ângulo de ressonância, calculado a partir da equação 4.13 a seguir.

$$X_{LTCSC}(\alpha) \quad = \quad X_{CTCSC} = \frac{1}{\omega C_{TCSC}} = 13,263\Omega \tag{4.13}$$

Resolvendo essa equação, temos o novo valor de $\alpha \approx$ 0,457 rad $\approx$ 26,18° , valor menor que o anterior que era $\alpha = 30° = \frac{\pi}{6}$ rad.

Considerando um ângulo de disparo acima do valor de ressonância, almejando o modo de condução Vernier Capacitivo que é o mais utilizado no compensador TCSC, no valor de 135°, temos $\alpha = 45° = \frac{\pi}{4}$ rad. Através da equação 4.6, 4.8, 4.9 e 4.10 é possível obter os valores deX_L, X_{TCSC}, X_{eq} e K, respectivamente.

$$X_L(\frac{\pi}{4}) \quad = \quad (2\pi * 60 * 20 * 10^{-3}) * (\frac{\pi}{\pi - 2\frac{\pi}{4} - \sin\frac{\pi}{4}}) \rightarrow X_L(\frac{\pi}{4}) = 27,42\Omega \tag{4.14}$$

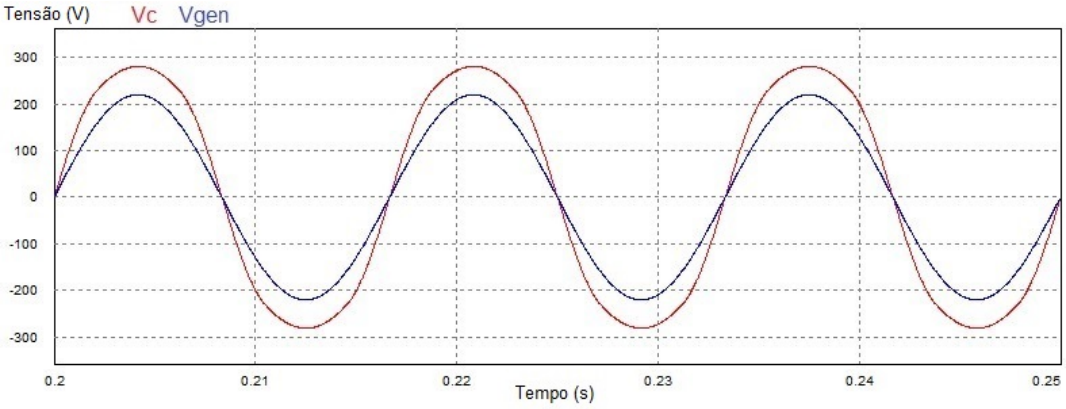
$$X_{TCSC} \quad = \quad \frac{X_C * X_L}{X_C + X_L} \rightarrow X_{TCSC} \approx 8,94\Omega \tag{4.15}$$

$$X_{eq} \quad = \quad \omega L_{Linha} - X_{TCSC} = 23,217\Omega \tag{4.16}$$

$$K \quad = \quad \frac{X_{TCSC}}{X_{Linha}} = 0,278 \tag{4.17}$$

Observando a figura 48 a seguir é possível observar que a tensão V_c no capacitor do TCSC se comporta conforme mostrado anteriormente na figura 25(b) do tópico acima.

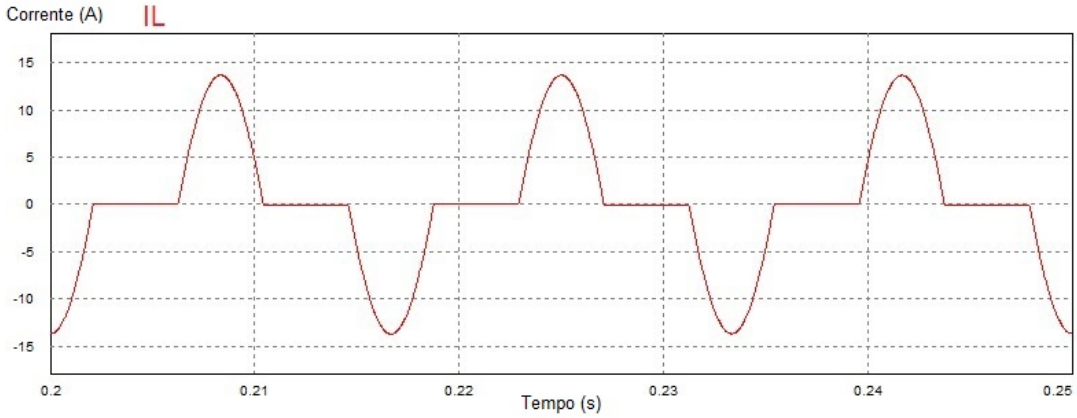
Figura 48 – Tensão Vc sobre o Capacitor do novo circuito do TCSC com valores comerciais.



Fonte: Produção do próprio autor.

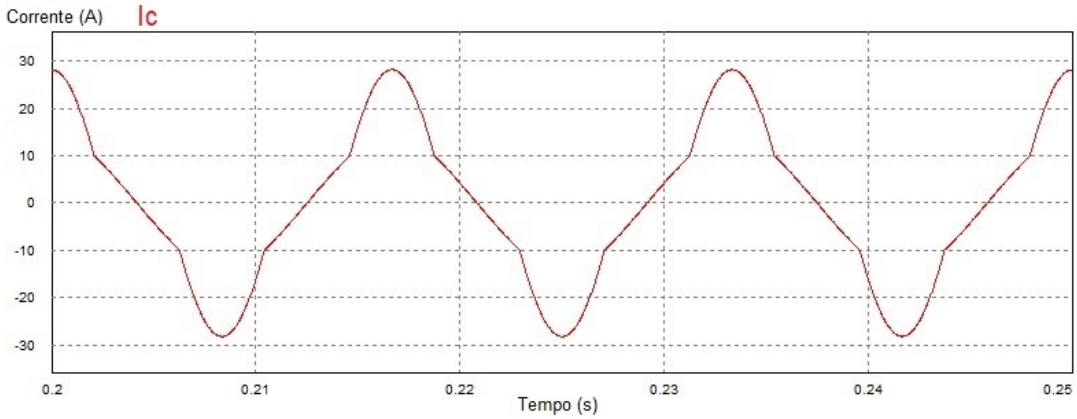
Também é possível observar nas figuras 49 e 50 que as correntes do indutor I_{LTCSC} e I_{CTCSC} possuem o mesmo padrão encontrado anteriormente nas figuras 26(b) e 27(b), respectivamente, do tópico anterior.

Figura 49 – Corrente IL no Tiristor do novo circuito do TCSC com valores comerciais.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 50 – Corrente Ic no Capacitor do novo circuito do TCSC com valores comerciais.



Fonte: Produção do próprio autor.

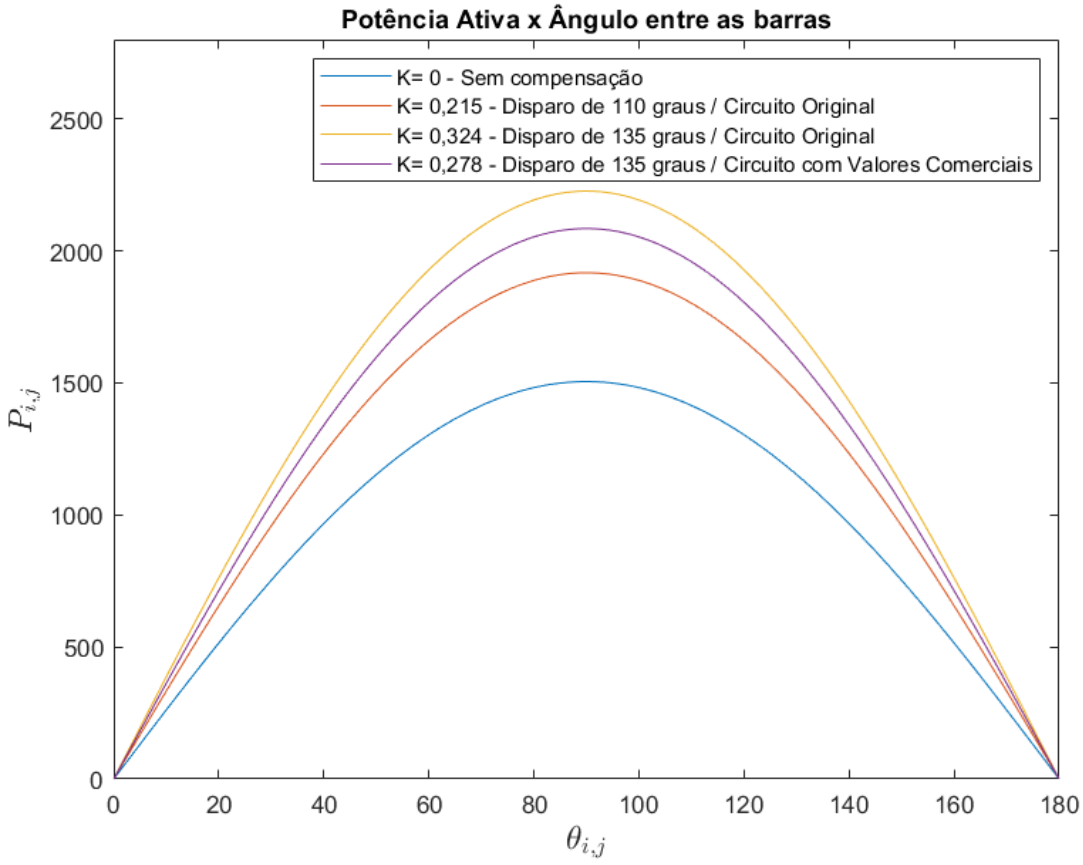
Assim como nas análises anteriores, as curvas das figuras 48, 49 e 50 são analisados a partir de 0,2 segundos pois é o tempo em que o sistema começa a responder em regime permanente e assim possibilitando uma comparação correta em relação aos gráficos das figuras 25(b), 26(b) e 27(b).

4.2.4 Resumo da seção

Como explicado anteriormente, o valor de compensação k está diretamente ligado ao fluxo de potência do sistema de transmissão entre duas barras e como cada teste realizado anteriormente entregou um valor de compensação k diferente, foram analisados os fluxos de potência de cada teste anterior.

Para os três testes realizados, temos os mesmos valores de impedância da linha de transmissão e as mesmas fontes de tensão, com módulos, ângulos e frequências idênticas, portanto conforme a equação 2.8, é possível gerar os gráficos da figura 51 a seguir.

Figura 51 – Curvas de Fluxo de Potência dos testes do TCSC.



Fonte: Produção do próprio autor.

A primeira curva, para k = 0, trata-se do fluxo de potência do circuito testado sem o compensador TCSC. A segunda curva, para k = 0,223, é o fluxo de potência do circuito com a inclusão do TCSC e o ângulo de disparo é de 110°, e o modo de condução Vernier é levemente indutivo. A terceira curva, para k = 0,324, é o fluxo de potência do circuito com o TCSC incluso e o ângulo de disparo é de 135°, e o modo de condução Vernier é capacitivo. Por fim, a quarta curva, para k = 0,278, é o fluxo de potência do circuito do TCSC modificado para os valores de capacitor e indutor comerciais. Este também possui ângulo de disparo de 135° e o modo de condução Vernier capacitivo.

É possível observar que a curva sem compensação é a que possui o menor fluxo de potência quando comparada com as outras. Ela representa o circuito puro, anterior ao compensador TCSC. As curvas para k = 0,223 e k = 0,278 são intermediárias, mostrando que o fluxo de potência melhora quando é incluso o TCSC. E por fim, a curva k = 0,324, cujo fluxo de potência é o maior entre elas, mostra que, para um mesmo ângulo de disparo, quando

comparada com a curva de k = 0,278, onde foi realizado o ajuste dos parâmetros do TCSC calculados, entregaram resultados melhores pro sistema, como o esperado.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho teve como objetivo trazer um conhecimento sobre FACTS em geral e trabalhar focando em FACTS do tipo TCSC, mostrando através de simulações computacionais seus funcionamentos para valores teóricos e práticos.

O trabalho apresentou um passo a passo de como são feitos os projetos de FACTS TCSC em projetos reais de forma que foram apresentadas as equações e seus resultados, primeiramente, em valores teóricos e, posteriormente, foram escolhidos valores reais, próximos aos valores calculados que são encontrados no mercado.

As simulações apresentadas para os valores teóricos mostraram um total casamento com o apresentado na teoria de FACTS, como era o esperado, permitindo validar as equações que foram utilizadas para a projeção.

Já nas simulações com valores reais, foi possível observar que as formas de onda se mantiveram próximas as teóricas, porém, apresentaram algumas variações esperadas, pois, ao se tratarem de valores reais existem algumas aproximações e compensações que acabam por gerar pequenas variações na resposta do circuito, reduzindo o ganho de fluxo de potência.

Por fim, o trabalho permite concluir que, com um projeto de FACTS TCSC bem calculado, o SEP é capaz de otimizar os fluxos de potências utilizadas em suas redes, aproveitando suas estruturas já construídas, de forma a aliviar o sistema contra instabilidades trazendo uma nova margem para a capacidade de energia transmitida pelo sistema, sem abrir mão da qualidade da energia fornecida. Porém, é importante ressaltar que, em simulações, não são levados em conta pontos importantes que devem ser analisados em trabalhos futuros, tais como, o custo da construção de uma FACTS TCSC para uma linha de transmissão real e de grande porte, as respostas dos harmônicos que podem existir na rede e como afetam o sistema e a parte de controle que é exigido pela FACTS TCSC que necessita de uma certa complexidade e precisão, o que demandaria de custos adicionais e uma manutenção periódica.

Para trabalhos futuros, seguindo as ideias trazidas por este trabalho, onde o foco é no compensador TCSC, algumas atividades podem ser realizadas de forma a otimizar a análise do circuito, tendo em vista que neste trabalho não foi utilizado uma linha real em campo, considerando sempre componentes ideais, o que não é o que acontece na vida real, onde

nas linhas de transmissão os componentes não ideias apresentam capacitância, resistência e indutância independente de qual componente é tratado, o que causam interferências ao sistema. Alguns exemplos são capacitores que possuem resistência, TRIACs que possuem queda de tensão, o chaveamento do sistema que não é linear na vida real e a falta de precisão no controle do ângulo de disparo que não foram considerados neste trabalho por se tratar de simulação, além de facilitar o entendimento e realização das contas.

Outra análise que pode ser feita em trabalhos futuros, está na implementação real do circuito do TCSC parametrizado com valores comerciais durante o desenvolvimento. Isso trará dados reais, através das leituras de um osciloscópio, proporcionando uma comparação interessante com o circuito simulado e os valores adquiridos pela teoria do TCSC.

Outra atividade futura pode ser diretamente focada no controle do ângulo de disparo do compensador TCSC. O objetivo deste trabalho era demonstrar o circuito TCSC e suas características, portanto os ângulos de disparo foram fixados. Porém com a viabilidade de leituras de tensão e corrente das barras em dois pontos da linha de transmissão, sendo um antes e outro depois da posição onde o compensador TCSC está instalado, pode-se alimentar um controlador automático capaz de calcular a necessidade de compensação e assim alterando o ângulo de disparo dos tiristores em malha fechada, também levando em consideração as componentes harmônicas desse controle.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, A. L. et al. Análise estática de estabilidade de tensão em sistemas elétricos de potência via nomogramas e computação paralela. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2013. Citado na página 15.

ALMADA, L. M. O modelo de injeção de potência do tcsc e sua aplicação no estudo da estabilidade a pequenas perturbações. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2012. Citado 3 vezes nas páginas 40, 54 e 56.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. Fundamentals of materials science and engineering. [S.l.]: Wiley London, 2000. v. 471660817. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

EDRIS, A.-A. Proposed terms and definitions for flexible ac transmission system (facts). IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 4, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 53.

ELÉTRICO, N. D. S. Ccee. 2017. Citado na página 15.

FERREIRA, M. A.; SILVEIRA, E. G.; LUIZ, A. S. A. Desempenho do relé de distância em linhas de transmissão compensadas com tcsc. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 57.

FILHO, S. A. Análise de controladores eletrônicos em sistemas de distribuição de energia. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2005. Citado 12 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 44 e 46.

FOGAÇA, A. L. B. Análise de controladores facts em sistemas de energia elétrica. 2006. Citado 6 vezes nas páginas 37, 38, 39, 42, 43 e 45.

FURINI, M. A. Estudo da estabilidade a pequenas perturbações de sistemas elétricos de potência multimáquinas sob a ação dos controladores facts tcsc e upfc. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2008. Citado na página 22.

GAMA, C. Brazilian north-south interconnection control-application and operating experience with a tcsc. In: IEEE. 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 99CH36364). [S.l.], 1999. v. 2, p. 1103–1108. Citado na página 52.

GERBEX, S.; CHERKAOUI, R.; GERMOND, A. Optimal location of facts devices to enhance power system security. In: IEEE. 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings,. [S.l.], 2003. v. 3, p. 7–pp. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 54.

HABUR, K.; O'LEARY, D. Facts-flexible alternating current transmission systems: for cost effective and reliable transmission of electrical energy. Siemens-World Bank document–Final Draft Report, Erlangen, v. 46, 2004. Citado 5 vezes nas páginas 47, 48, 50, 51 e 53.

HINGORANI, N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. Proceedings of the IEEE, IEEE, v. 76, n. 4, p. 481–482, 1988. Citado na página 27.

HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. et al. Concepts and technology of flexible ac transmission systems. Understanding FACTS, IEEE Press book, p. 210, 2000. Citado 18 vezes nas páginas 19, 20, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 36, 38, 39, 42, 43, 46, 54 e 56.

JALALI, S.; HEDIN, R.; REITMAN, T.; TORRE, W.; MITTELSTADT, W. Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) impedance and linearized models for power swing and torsional analysis. Final report. [S.l.], 1998. Citado na página 52.

LIMA, G. R. S. Alocação de tcsc em linhas de transmissão congestionadas como forma de se garantir o fluxo de potência ótimo com restrição de segurança em condição de contingências n-1. 2020. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 23.

LIMA, J. W. M. Alocação Ótima de equipamentos facts em sistemas elétricos de potência. Centro de Gestão, Tecnologia e Inovação (CGTI), 2016. Citado na página 28.

MACHADO, R. L. et al. Aplicação de dispositivos facts no sistema de transmissão da eletrosul. Florianópolis, SC, 2003. Citado 11 vezes nas páginas 20, 21, 28, 29, 30, 58, 59, 60, 61, 62 e 63.

MANUAL PSIM, U. Powersim Inc., 2020. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

MELO, M. Q. D. Operação em Regime Permanente de Linhas Aéreas de Transmissão Otimizadas. Tese (Doutorado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2021. Citado na página 47.

MIASAKI, C. T. Planejamento da expansao do sistema de transmissao de energia elétrica utilizando controladores facts. Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2006. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 23 e 55.

MIOTTO, E. L. Análise da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas com dispositivos FACTS TCSC e controladores robustos. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Londrina, 2010. Citado na página 16.

MOURA, A.; MOURA, A.; ROCHA, E. Transmissão de energia elétrica em corrente alternada. [S.l.]: Fortaleza-Brasil: Editora da Universidade Federal do Ceará, 2019. Citado na página 49.

NASCIMENTO, L. B. F. do; TEIXEIRA, R. C. M.; FERNANDES, R. de A.; REGO, S. B. T. Implementação de uma chave de transferência estática aplicada a sistemas de iluminação a led utilizando um sistema fotovoltaico off-grid. Citado na página 64.

OKEKE, T. U.; ZAHER, R. G. Flexible ac transmission systems (facts). In: IEEE. 2013 international conference on new concepts in smart cities: fostering public and private alliances (SmartMILE). [S.l.], 2013. p. 1–4. Citado na página 53.

PADIYAR, K. R. Facts controllers in power transmission and distribution. New Age International, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 55 e 56.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Condicionamento de energia elétrica e dispositivos facts. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 46 e 54.

RODRIGUES, J. M. F. Análise e Modelação de Dispositivos FACTS Aplicados nas Redes de Transporte e de Distribuição de Energia Eléctrica. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto (Portugal), 2010. Citado 3 vezes nas páginas 43, 44 e 45.

SCHAUDER, C.; GERNHARDT, M.; STACEY, E.; LEMAK, T.; GYUGYI, L.; CEASE, T.; EDRIS, A. Operation of/spl plusmn/100 mvar tva statcon. IEEE Transactions on Power Delivery, IEEE, v. 12, n. 4, p. 1805–1811, 1997. Citado na página 52.

SEGUNDO, A. K. R.; RODRIGUES, C. L. C. Eletrônica de potência e acionamentos elétricos. Ouro Preto: Ifmg-Instituto Federal de Ciencia, Educação e Tecnologia de Minas Gerais, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.

SILVA, C. A.; CAMPOS, G. L.; SANTOS, M. G. dos; OLIVEIRA, M. L. R.; NOBREGA, R. V. T. da. Análise conceitual de linhas de transmissão operando em regime permanente senoidal1. 2016. Citado na página 18.

SILVA, R. L. F. P. d. Estudos da capacidade de transporte em linhas de transmissão utilizando ferramentas de otimização. 2008. Citado na página 24.

SONG, Y.-H.; JOHNS, A. Flexible ac transmission systems (FACTS). [S.l.]: IET, 1999. Citado na página 16.

SUTANTO, D.; LACHS, W. Control options in power system operation by use of flexible ac transmission system (facts). IFAC Proceedings Volumes, Elsevier, v. 26, n. 2, p. 817–820, 1993. Citado na página 30.

TOKUNO, S. E. Análise de modelos e aplicação do UPFC em sistema de 138 kV. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 52 e 53.

TORTELLI, O. L. Alocação e operação de controladores facts em sistemas elétricos de potência. Tede de Doutorado, FEEC-UNICAMP, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 15, 57 e 58.

WATANABE, E. H.; BARBOSA, P. G.; ALMEIDA, K. C.; TARANTO, G. N. Tecnologia facts-tutorial. SBA Controle & Automação, v. 9, n. 1, p. 39–55, 1998. Citado na página 16.